



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VÝROBA SOUČÁSTI „ČÁST KRYTU CT“

MANUFACTURE OF COMPONENTS „PART OF THE COVER CT“

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Martin DOLÁK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Ladislav ŽÁK, Ph.D.

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Martin Dolák

který/která studuje v bakalářském studijním programu

obor: Strojírenská technologie (2303R002)

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Výroba součásti "Část krytu CT"

v anglickém jazyce:

Manufacture of components "Part of the cover CT"

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Návrh technologie výroby zadané součásti a konstrukční řešení tvářecího nástroje.

Cíle bakalářské práce:

1. Zhodnocení současného stavu výroby
2. Literární studie
3. Návrh technologie výroby
4. Konstrukční řešení nástroje
5. Ekonomické vyhodnocení
6. Závěr

Seznam odborné literatury:

BOLJANOVIC, Vukota. Sheet Metal Forming Processes and Die Design. U.S. (USA) : Industrial Press Inc., 2005. ISBN 9780831132590. 400 s.

BIRZER, Franz. Forming and fineblanking : cost-effective manufacture of accurate sheetmetal parts. 1st edition. Landsberg/Lech : Verl. Moderne Industrie, 1997. ISBN 3-478-93161-4. 70 s.

DVOŘÁK, M., F. GAJDOŠ a K. NOVOTNÝ. Technologie tváření : plošné a objemové tváření. 4. vyd. Brno : Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2007. ISBN 978-80-214-3425-7. VESELÝ, Roman. Technologie slévání, tváření a svařování. Praha : České vysoké učení technické, 1996. ISBN 80-01-01420-7. 227 s. Vedoucí semestrální práce Ing. Tomáš Hrala.. 169 s.

FREMUNT, Přemysl a Tomáš PODRÁBSKÝ. Konstrukční oceli. Brno : CERM, 1996. ISBN 80-85867-95-8 . 267 s.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Ladislav Žák, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 20.11.2013

L.S.

prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.
Ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Řešenou součástí je část krytu zařízení na magnetickou rezonanci. Jedná se o tvarovou součást, jež byla konstruktéry předurčena k výrobě tvářením tlakem kapaliny, konkrétně metodou hydroform. Práce se zabývá změnou výrobní technologie na ohýbání a svařování. Pro tuto změnu je vytvořen konstrukční úprava dílu, tedy rozdělení na dvě části a technologický postup. Možnost užití stávajícího strojového parku firmy byla ověřena výpočty. Na závěr byl zkonstruován a vyroben speciální tvářecí nástroj. Správnost aplikace je ověřena úspěšnou výrobou součásti.

Klíčová slova

tváření, stříhání, ohýbání, technologie

ABSTRACT

This thesis is about production of part of CT cover. It is part of specific shape which was designed to be produced using hydroform technology. The aim of this thesis is to document the steps leading to change the technology into bending and welding. The part has to be split into two different part and new operation list has to be invented. The use of current machine equipment of Exerion company was proved possible by calculations. The final step was designing and production of special bending tool. Application of above mentioned was proved by successful production of part.

Key words

forming, shearing, bending, technology

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DOLÁK, Martin. *Výroba součástí "Část krytu CT"*. Brno: 2014. 36 s, 5 výkresů, 4 přílohy, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření. Vedoucí práce Ing. Ladislav Žák, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Výroba součástí „Část krytu CT“** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu použité literatury.

Ve Šternberku dne 29.5.2014

Martin Dolák

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji v první řadě vedoucímu své bakalářské práce panu Ing. Ladislavu Žákovi Ph.D., dále pak firmě Exerion Precision Technology Olomouc s.r.o. za poskytnuté podklady a v neposlední řadě své přítelkyni za trpělivost.

OBSAH

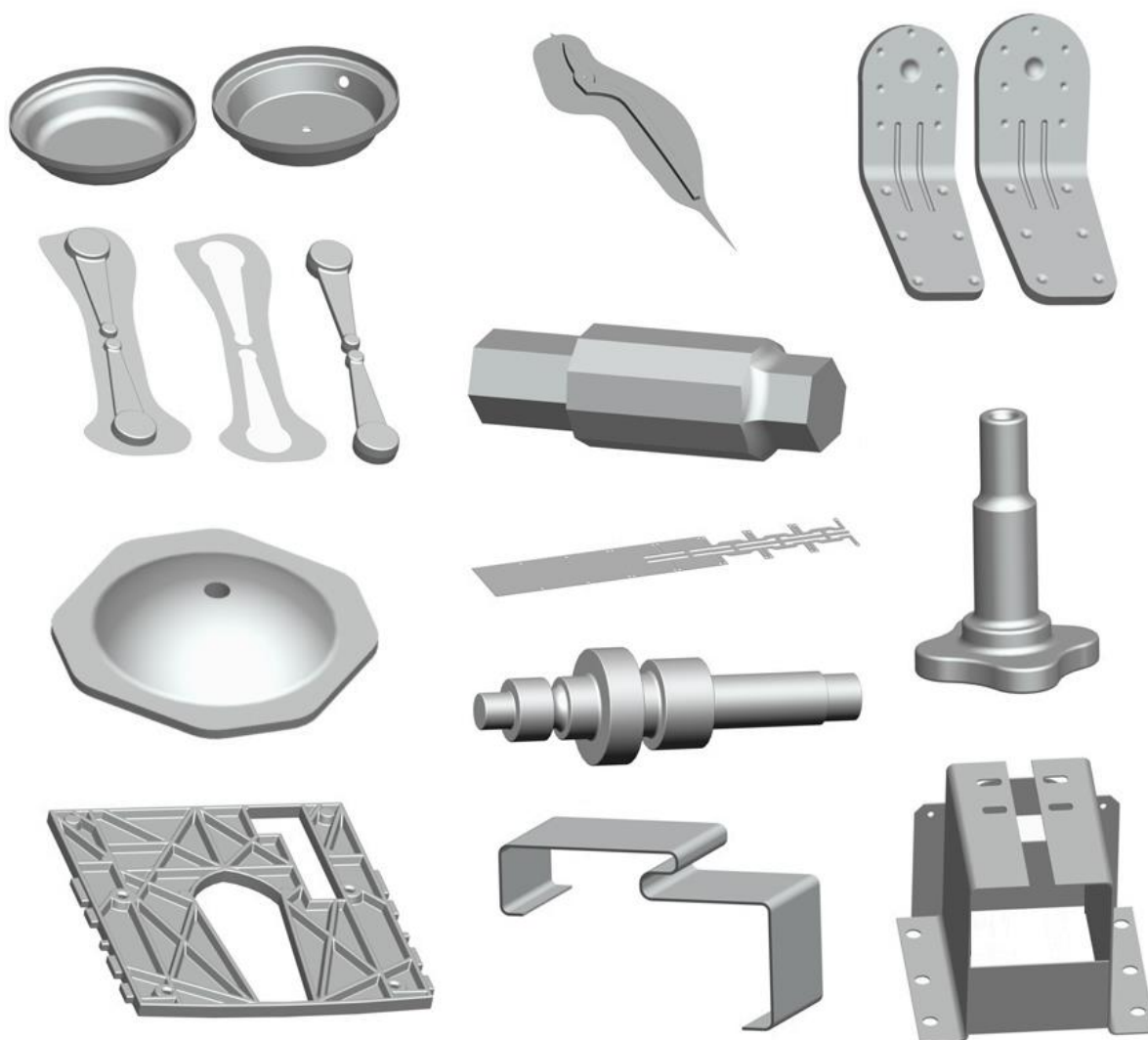
ABSTRAKT	4
ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ	6
PODĚKOVÁNÍ	7
OBSAH	8
ÚVOD [4, 14]	9
1 ZHODNOCENÍ SOUČASNÉHO STAVU VÝROBY	10
2 LITERÁRNÍ STUDIE [1, 2, 4, 5, 16]	13
2.1 Tváření	13
2.2 Elastická a plastická deformace	13
2.3 Materiály vhodné ke tváření	14
2.4 Stříhání	14
2.5 Řezání laserovým paprskem	16
2.6 Ohýbání	17
2.7 Svařování	20
3 NÁVRH TECHNOLOGIE VÝROBY [8, 10, 12]	22
3.1 Možnosti výroby součásti	22
3.2 Materiál	23
3.3 Rozdělení původní součásti	24
3.4 Technologický postup	24
3.5 Řezání a stříhání plechu	25
3.6 Ohýbání součásti	27
3.7 Změna technologického postupu	28
3.8 Svařování a broušení součásti	29
4 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ NÁSTROJE	31
4.1 Návrh ohýbacího nástroje	31
4.2 Výroba a kontrola	31
4.3 Výhled pro konstrukci nástroje	33
5 EKONOMICKÉ VYHODNOCENÍ	34
6 ZÁVĚR	36
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	37
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	39
SEZNAM OBRÁZKŮ	41
SEZNAM TABULEK	41
SEZNAM PŘÍLOH	42

ÚVOD [4, 14]

Strojírenství svou bohatou historií a zajímavou budoucností patří mezi nejvýznamnější obory lidské činnosti a to především užitím mnoha rozmanitých technologií pro výrobu součástí a mechanismů usnadňujících lidem pracovní i soukromý život. Mezi tyto technologie se řadí i tváření. Jedná se o způsob zhotovení výrobků z polotovarů bez porušení struktury původního materiálu. Jedinou výjimkou je technologie stříhání, při které je naopak porušení materiálu cílené.

Pomocí tváření je tedy možno hospodárně vyrábět součásti různých tvarů a rozměrů. Hospodárností se rozumí dobrý poměr využití materiálu a spotřebované energie pro přeměnu polotovaru na výsledný výrobek této výrobní technologie v porovnání s některými jinými metodami. Plošné tváření pak umožňuje výrobu součástí bez výrazné změny plochy vzhledem ke vstupnímu materiálu. Toto přetvoření probíhá za studena.

Na obrázku (viz Obr. 1) je celá škála výrobků zhotovených tvářením plošným, objemovým, za studena i za tepla. Mezi typické příklady patří výstřižky, tvarové profily, výtažky, výrobky zhotovené pēchováním, protahováním a výkovky.



Obr. 1 Typické součásti vyrobené tvářením [14]

1 ZHODNOCENÍ SOUČASNÉHO STAVU VÝROBY

Soustava krytů pro CT zařízení „Skeleton Bottom Frame“ (viz obrázek 4), ze které pochází i řešená součást „Plinth Backpack“ (viz obrázky 5, 6 a 7), je vyráběna ve firmě Exerion Precision Technology Olomouc s.r.o. (dále jen Exerion PTO). Jedná se o českou firmu založenou v roce 1998 jako Dru-Mora oddělením části firmy Mora. Je dceřinou společností nizozemské firmy Exerion Precision Technology Ulft B.V. (viz obrázek 2), jež vznikla v roce 1974 odtržením ze společnosti Dru, známé holandské slévárny, v té době však již transformující na výrobu lisovaných částí pro automobilový průmysl. Jejím byznysem byla historicky hlavně výroba topných těles a sporáků.



Obr. 2 Sídlo Exerion Precision Technology Ulft v Nizozemí [6]

V České republice tedy sídlí výrobní společnost, která se zabývá produkcí montážních sestav i jednotlivých dílů pro vysokokapacitní kopírovací stroje. Exerion PTO se nachází v Olomouci, avšak po několik let se montážní sekce firmy nacházela ve Šternberku. Po ukončení nájmu v areálu původní firmy Brano v roce 2006, se výrobní a administrativní část přestěhovaly do Šternberka. Intenzivní hledání nového vhodného areálu pro rozrůstající se podnikání mělo za následek přesídlení společnosti zpět do Olomouce (viz obrázek 3).

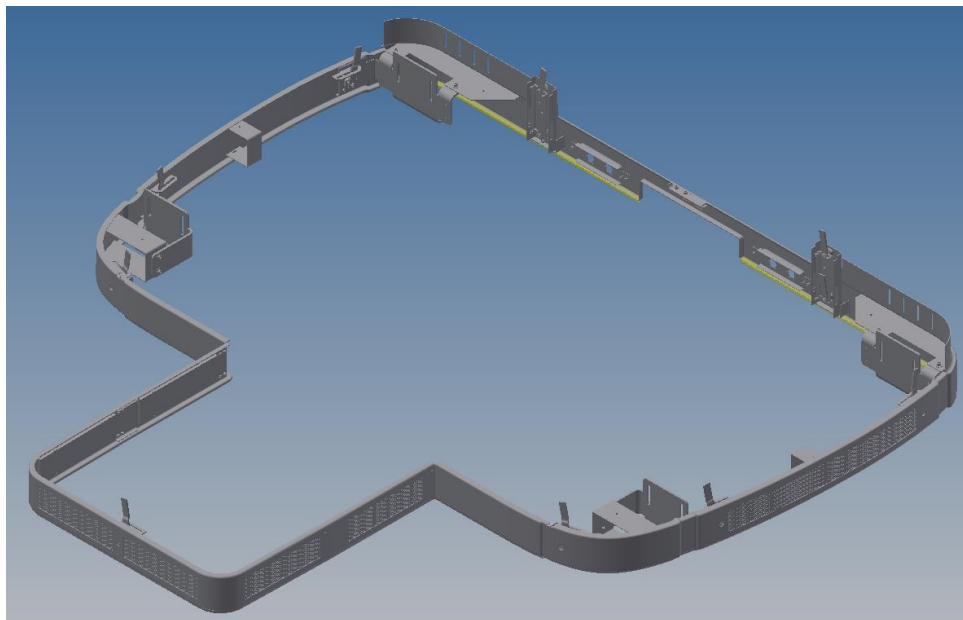


Obr. 3 Prostory firmy Exerion Precision Technology Olomouc [7]

Na konci prvního desetiletí 21. století byla tato firma oslovena zákazníky vyrábějícími zařízení pro zdravotnickou sféru, např. rentgeny, zařízení pro diagnostiku krve a podobné. Od té doby se výrobní spektrum výrazně změnilo. Většina nových zakázek pochází právě od firem specializujících se na řešení pro klientelu ze zdravotnictví. Změnou portfolia jsou výrazně ovlivněny strategické cíle firmy i s ohledem na menší perspektivu 2D tiskařského byznysu. Společnost Exerion PTO dodává své výrobky téměř do celého světa, mezi nejznámější zákazníky patří firmy jako Océ, Kodak, Hewlett-Packard, Siemens či Philips.

V současné době zaměstnává přibližně 100 zaměstnanců. Montážní a výrobní části závodu zůstaly zachovány, aby bylo možné zákazníkům nabídnout komplexní řešení pro zpracování zakázek od vstupního materiálu (plechové tabule) až prakticky k hotovému výrobku. Firma disponuje zkušenostmi z plošného tváření, některými prvky obrábění, spojování materiálů nerozebíratelnými spoji jako svařování, lisování, témování a nýtování. K patřičným technologiím také vlastní potřebné stroje. Hlavním nedostatkem celého zpracovatelského řetězce

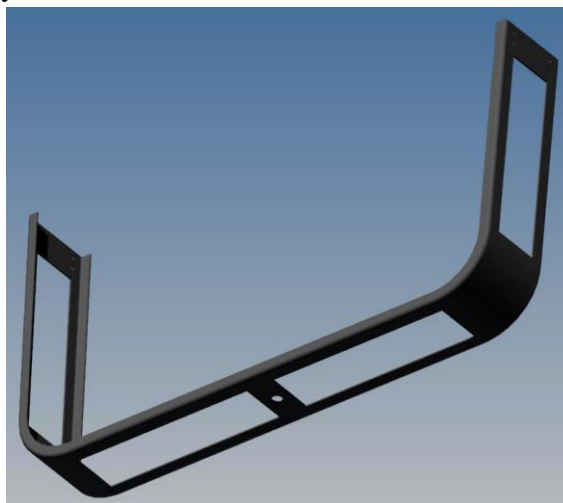
Exerionu PTO tak zůstává potřeba kooperovat veškeré povrchové úpravy. Krom nepřímé možnosti kontrolovat tyto procesy se ještě musí připočítat další prodleva při transportu výrobků k dodavateli povrchových úprav a s dopravou spojených rizik.



Obr. 4 Sestava krytů CT zařízení „Skeleton Bottom Frame“

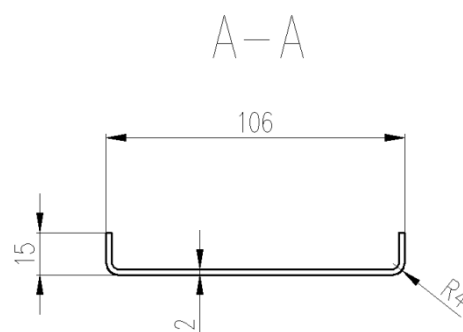
Výrobu dané součásti pro firmu Philips Medical USA měl ve firmě Exerion PTO na starost tým zkušených zaměstnanců, v čele s autorem této práce. Součást z hlediska konstrukčního řešení byla vymyšlena tak, aby plnila krycí funkci pro instalovanou elektroniku a zároveň vizuálně nenarušovala vzhled celého zařízení na magnetickou rezonanci. Z hlediska technologie šlo o výrobu pomocí tvářecí technologie hydroform. Firma Exerion PTO ani PTU touto technologií však nedisponuje, ale záměr výroby takové součásti přivedl nápad na vytvoření alternativního řešení zhotovení pomocí plošného tváření a svařování.

Úkolem týmu ve firmě Exerion PTO byla úprava konstrukce, aby nedošlo ke změně výsledných rozměrů krytu a navržnutí technologického postupu výroby. Mimo jiné musely být splněny požadavky zákazníka na tvar a povrchovou úpravu součásti. Jediným prvkem procesu, jehož realizace byla uvažována u jednoho z dodavatelů, je povrchová úprava. Zákazník poskytl seznam jím schválených lakoven, ze které byla zvolena jediná, která se nachází na území České republiky.

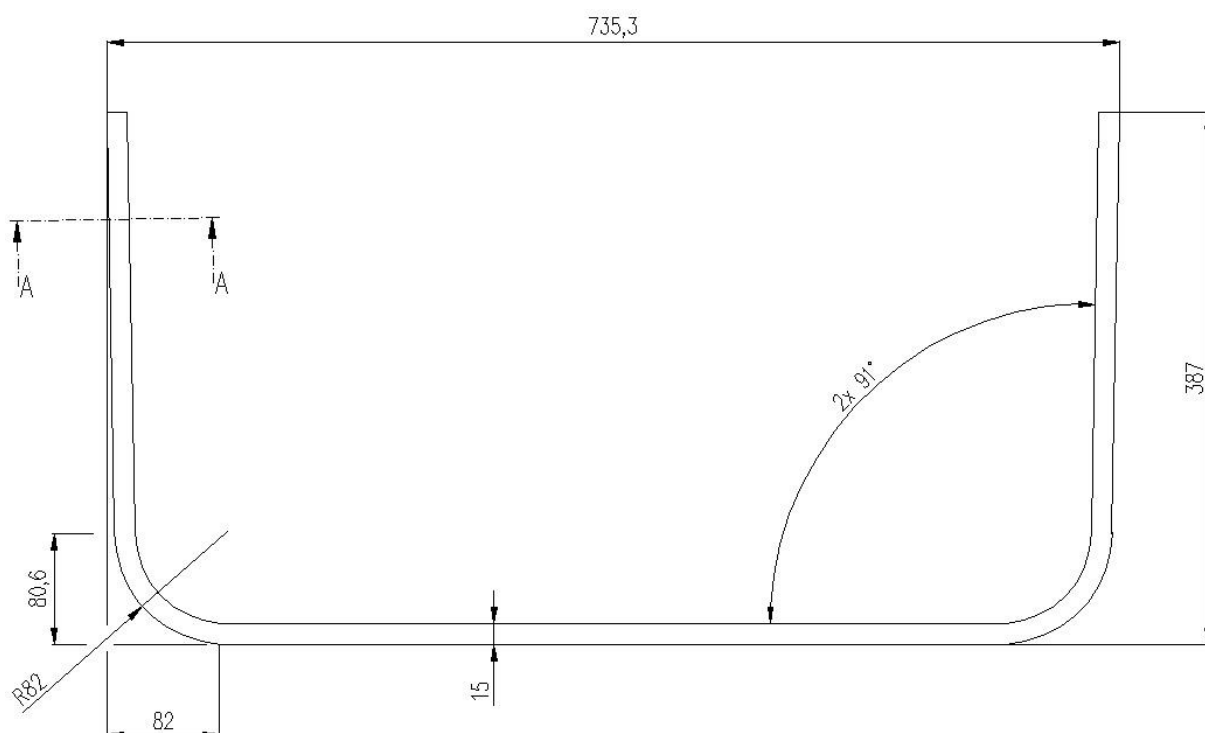


Obr. 5 Model řešené součásti Plinth Backpack

Vedení firmy Exerion PTO chtělo součásti vyrábět s využitím aktuálního strojového parku. Jedná se tedy o kombinovaný laser Trumpf TruCut 600L nebo standardní laser Trumpf TruLaser 3030, dále pak jsou k dispozici ohraňovací lisy Trumpf TrumaBend V85, V130 a V1300. Ke svařování se pak používá několika různých TIG svářecích jednotek a jednoho CNC robotického ramena s MAG svařovací hlavou. Dále pak jsou ve firmě stroje určené k odporovému bodovému svařování.



Obr. 7 Řez A-A řešenou součástí



Obr. 6 Rozměry součásti „Plinth Backpack“ (zákaznické číslo 4598-003-04271)

2 LITERÁRNÍ STUDIE [1, 2, 4, 5, 16]

2.1 Tváření

V dnešní praxi se používá velké množství rozmanitých tvářecích metod. Spousta těchto procesů, které jsou založeny na deformaci a jsou používány zejména v automobilovém a leteckém průmyslu, funguje za pomoci komplexních zařízení a nářadí vyrobených na základě nejnovějších technologií a výzkumů. S ohledem na nedávný pokrok a probíhající vývoj lze očekávat, že nové technologie budou ještě efektivnější, méně ekonomicky nákladné nebo umožní větší přesnost výroby. Na druhou stranu stejně jako nyní se používají některé základní letité procesy, přestože existují nové technologie, dá se tento trend očekávat i nadále.

Tváření je jednou z nejrozšířenějších metod hromadné a sériové výroby přesných dílů rozličných tvarů a rozměrů. Dále se tvářením získávají polotovary pro další zpracování jinými (i tvářecími) technologiemi. Jedná se o jednu z metod obrábění, v přísnější specifikaci o beztržskovou podobu obráběcího procesu. Základem je přetváření vstupního materiálu působením vnějších sil na výsledný výrobek, aniž by došlo k porušení materiálu.

Tváření lze obecně rozdělit na plošné a objemové. Plošné tváření je taková přeměna materiálu, při které nedochází k výrazné změně průřezu materiálu či jeho plochy. Mezi plošné tváření se řadí stříhání (a jeho derivace), což je jediná tvářecí technologie, při které je cílem přerušení materiálu. Dále pak ohýbání (vč. profilování, lemování, zakružování, stáčení, ad.), tažení (vč. hlubokého tažení, vypínání, kovotlačení, protahování, přetahování) a tvarování (tj. rovnání, zužování a rozšiřování).

Objemové tváření se dělí do dvou základních kategorií, a sice tváření za tepla a za studena. Rozdíl je v teplotách, za kterých přetvárný proces probíhá. Vzniká-li pod rekrytalizační teplotou daného materiálu, jedná se o tváření za studena. Mezi tato se řadí zejména ražení, přechování, protlačování apod. Naopak při tváření za tepla je deformován materiál zahrátý nad rekrytalizační teplotou. Typickými zástupci jsou kování a zápuťkové kování.

2.2 Elastická a plastická deformace

Rozdíl mezi plastickou a elastickou deformací je značný. Zatímco elasticita je schopnost materiálu navrátit se po zatížení do svého původního stavu, plasticita je naopak fyzikální vlastnost umožňující materiálu trvale změnit tvar bez porušení krystalické mřížky.

Elastická deformace je tedy popsána Hookovým zákonem, který předpokládá přímou úměru mezi namáháním a napětím materiálu. Probíhá u většiny kovových materiálů pouze na samotném počátku zatěžování. Objevuje se při zatížení nepřesahující mez kluzu R_e . Při tváření se jedná o jev nežádoucí, se kterým je nutno počítat a proces náležitě uzpůsobit. V opačném případě nedojde k vyrobení součásti dle požadavku konstrukce.

Při plastické deformaci způsobené tvářecími pochody iniciuje v materiálu pohyb dislokací, tedy skluz nebo dvojčatění. Krystalografické roviny s nejhustším uspořádáním atomů jsou místem výskytu skluzu. Malé deformace jsou reprezentovány dvojčatěním, kdy se původní krystalická struktura zrcadlí podle roviny dvojčatění. V materiálu vzniká oblast zpevnění.

Deformace probíhající v materiálu se řídí zákony plastické deformace, jako například zákon zachování objemu, zákon nejmenšího odporu, zákon podobnosti či zákon přídavných napětí a nerovnoměrnosti deformace. U zachování objemu je základním předpokladem nestlačitelnost kovů. Nejmenší odpor pak značí, že se každý bod tvářeného tělesa bude ubírat směrem, ve kterém je mu kladem nejmenší odpor. Tento zákon se velmi často používá při výrobě tvářecích nástrojů. Zákon podobnosti umožňuje aplikaci tvářecích pochodů z modelových situací na praktické metody.

2.3 Materiály vhodné ke tváření

Tvářitelnost plechu je ovlivněna několika faktory, mezi něž spadá chemické složení, mikrostruktura a také textura materiálu. Ke tváření se velmi dobře hodí hlubokotažné oceli. Nízkouhlíkové hlubokotažné oceli obsahují spousty dalších prvků (např. křemík, mangan, fosfor, atp.), které se do směsi dostaly ze surového železa a ocelového odpadu při metalurgii. Jedná se o oceli třídy 11, například 11 301, 11 321, 11 325, 11 331, 11 343 ad. Dále se dají rozlišit na uklidněné a neuklidněné. Ty první obsahují navíc stopové množství stabilizačních prvků jako je hliník, titan, vanad, zirkon či niob. Jedná se vesměs o setiny hmotnostního procenta.

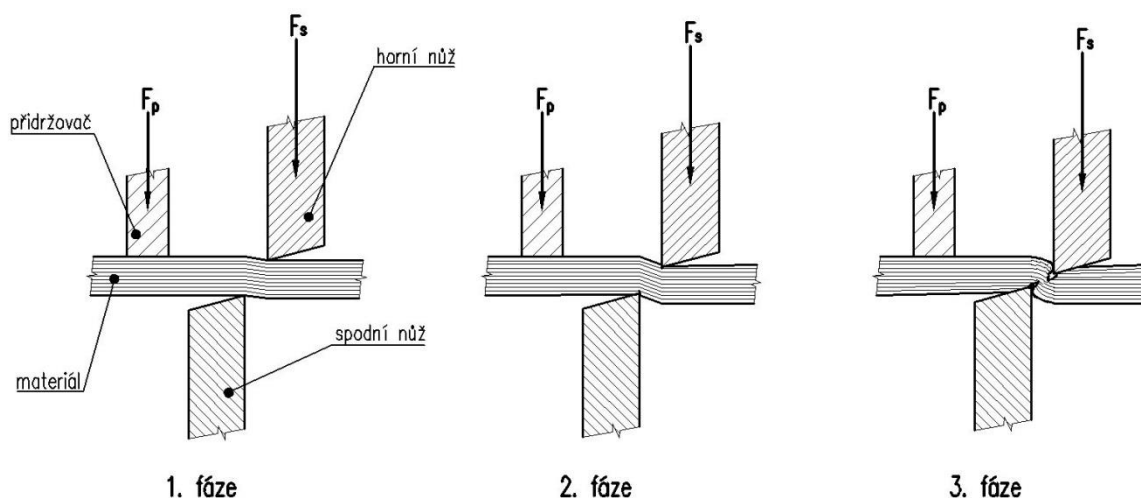
Mikrostruktura hraje významnou roli pro tvářecí proces. Základní strukturou jsou ferit a cementit. Velikost zrna, rozložení a obsah vměstků jsou výrazným činitelem ovlivňujícím mechanické vlastnosti materiálu. Nevýhodné je uspořádání cementitu v řádcích, rozdíl velikosti zrn by neměl být větší než 2 čísla. Definuje se zde pojem mikročistota oceli, což je koncentrace nekovových vměstků.

Mechanické vlastnosti ocelí válcovaných za studena nejvíce ovlivňuje obsah uhlíku. Neměl by přesahovat hodnotu 0,07 hmotnostního procenta. Tvářet lze běžně i plechy s povrchovou úpravou, dnes obvykle pozinkované pochromované či s povlakem plastické hmoty.

Pro zjištění tvářitelnosti materiálu se spíše než chemické rozborů, tahové zkoušky a zkoušky tvrdosti, osvědčily metody založené na simulaci reálných tvářecích procesů. Byly tedy vyvinuty zkoušky tváření podle Erichsen, kalíškovací zkoušky, zkouška tažením v kuželové tažnici a mnoho dalších.

2.4 Stříhání

„Technologie stříhání je nejrozšířenějším způsobem zpracování plechu, ať už se jedná o finální výrobek nebo polotovary určené k dalšímu zpracování (např. rondely pro tažení atd.).“ [4] Střížní proces je založen na vnikání ostří dvou protilehlých nástrojů do materiálu za účelem jeho oddělení. Jelikož přerušeni nevznikne přesně v rovině, pojednává se o takzvaném esovitém zakřivení střížné plochy. Hlavním činitelem je v tomto procesu smykové napětí, které spolu s elasticitou a tvárností materiálu způsobuje tlak nožů na celé ploše. Samotné stříhání lze rozfázovat do tří částí (viz obrázek 8).

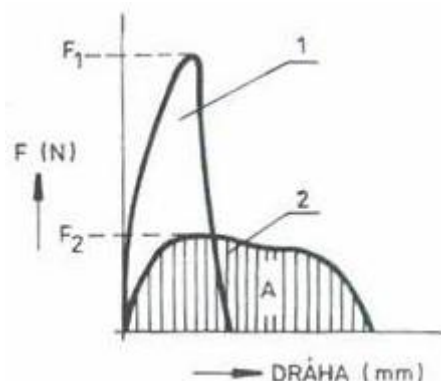


Obr. 8 Fáze stříhání [2]

V první fázi dochází pouze k elastické deformaci, jejíž míra závisí na mechanických vlastnostech zpracovávaného materiálu. Zpravidla se jedná o oblast 5 – 8 % tloušťky stříhaného

materiálu. Mez kluzu R_e materiálu není překročena, proto se v případě odlehčení vrátí do své původní podoby. Působením horního a spodního nástroje dochází ke tvorbě silových dvojic, které namáhají tvářený materiál ohybovým momentem. Důsledkem jsou pak charakteristické stopy na materiálu, kde dochází k zaoblení ze strany střížníku (vtažení) i střížnice (vytlačení). Druhá fáze stříhání je typická plastickou deformací, kdy překročením meze kluzu R_e materiálu (nikoli však meze pevnosti R_m) dochází k jeho nevratnému porušení. I zde je hloubka vniku ostří nástroje do materiálu přímo závislá na jeho mechanických vlastnostech, obecně se pohybuje v rozmezí 10 – 25 % tloušťky plechu.

Ve třetí fázi dochází k úplnému přerušení materiálu důsledkem dosažení meze pevnosti R_m . Toto nastává v místě, kde se vytvořila první trhlinka. Vzniká zde dvojsoá napjatost, která se projevuje tahovým namáháním materiálu a rozšiřováním trhlín. Zbytek tloušťky plechu se utrhne. S ohledem na tvorbu střížné plochy bude mít povrch rozdílnou jakost – místy hladký, jinde drsný (utržení).



Obr. 9 Průběh sil; práce [4]

Existují různé podoby stříhání, které ovlivňují okamžitou střížnou sílu a práci v průběhu stříhu kinematikou svého pohybu. Jedná se o stříhání rovnoběžnými noži, skloněnými noži a stříhání kotoučovými noži. Výpočet hodnot se proto v jednotlivých případech liší. Vzorcem 2.1 je popsán výpočet střížné síly rovnoběžnými noži.

$$F_s = \tau \cdot S_s \cdot n \text{ [N]} \quad (2.1)$$

$$\tau = 0,8 \cdot R_m \text{ [MPa]} \quad (2.2)$$

$$S_s = \pi \cdot D \cdot s \text{ [mm}^2\text{]} \quad (2.3)$$

Kde S_s v dané podobě platí pro výpočet kruhových děr. Dále n je součinitelem otupení nože a pohybuje se mezi 1,1 až 1,5. Maximální střížná síla F_{smax} se však v průběhu stříhu vypočítá navýšením síly F_s o 15 – 30 % (viz vzorec 2.4). Tímto se zohlední kombinované namáhání (stříh a ohyb), které ve skutečnosti v materiálu vzniká zároveň s otupením nástrojů. Práce vzniklá stříhem se spočítá ze vzorce 2.5.

$$F_{smax} = (1,15 - 1,3) \cdot F_s \text{ [N]} \quad (2.4)$$

$$A_s = \frac{\pi \cdot F_{smax} \cdot s \cdot \lambda}{2} \text{ [J]} \quad (2.5)$$

Kde λ představuje součinitel plnosti. U nožů skloněných se maximální střížná síla snižuje, ačkoli práce vykonaná při procesu zůstává srovnatelná, jelikož síla působí na větší dráze (viz obrázek 9, F_2 pro skloněné nože, F_1 pro rovné).

Dalším velmi důležitým parametrem stříhání je střížná vůle. Lze ji definovat jako rozdíl vnitřního rozměru střížnice a vnějšího rozměru střížníku. Jedná se o dvojnásobek mezery (viz vzorec 2.6) mezi oběma nástroji. Obecně se dá říct, že střížná vůle se odvíjí od pevnosti a tloušťky zpracovávaného materiálu. U měkkých ocelí se pohybuje zpravidla mezi 2,5 – 7,5 % tloušťky materiálu. U středně tvrdých ocelí, s mezí pevnosti okolo 480 MPa se zvyšuje na 3 až 8,5 % tloušťky. Největší vůle se volí u ocelí tvrdých, tj. těch s mezí pevností 800 MPa a vyšší, kde může dosahovat až 10 % tloušťky plechu. Má zásadní význam pro správné provedení stříhu, optimální užití střížných sil a v neposlední řadě pro průběh vnitřních napětí

při jednotlivých fázích oddělování materiálu. Důsledkem je i rozdíl v jakosti povrchu střižné plochy. Mezera taktéž výrazně ovlivňuje trvanlivost nástrojů.

Zvětšování vůle má za následek nerovný povrch, zatímco se snižuje potřebná střižná síla (potažmo práce). Normálová napětí mají tahovou podobu, což napomáhá oddělování materiálu. Naopak menší vůle způsobuje zkvalitnění plochy stříhu. Je potřeba použití větší střižné síly, v materiálu pak vznikají tlaková napětí, která napomáhají udržet materiál v přímém kontaktu se střižníkem. Nevýhodou je však rychlejší otupení nástrojů. Proto je vhodné volit takovou střižnou mezeru, aby bylo dosaženo požadovaného poměru mezi jakostí střižné plochy a velikostí střižné síly potřebné k oddělení materiálu.

$$v = 2z \text{ [mm]} \quad (2.6)$$

U plechů o tloušťce do 3 mm včetně se střižná vůle vypočítá ze vzorce 2.7.

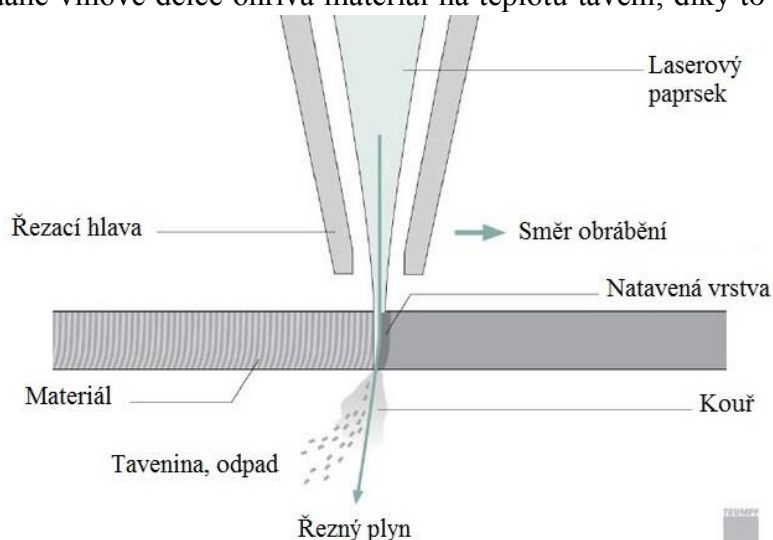
$$v = 0,32 \cdot c \cdot s \cdot \sqrt{\tau} \text{ [mm]} \quad (2.7)$$

Kde c je koeficient typu stříhání. Nabývá hodnot 0,005 až 0,035. Běžně se používá hodnota 0,01. Pro plechy větších tlouštěk pak má vzorec následující upravenou podobu.

$$v = 0,32 \cdot (1,5 \cdot c \cdot s - 0,0015) \cdot \tau \text{ [mm]} \quad (2.8)$$

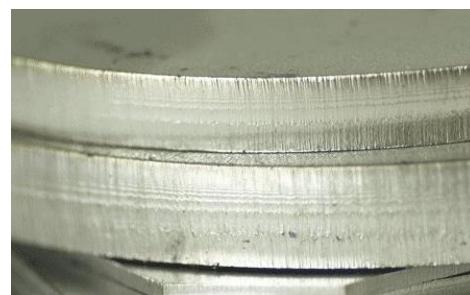
2.5 Řezání laserovým paprskem

Jedná se o moderní a velmi efektivní metodu dělení kovových i nekovových (např. guma, plast, dřevo) materiálů úzkým přesným řezem bez ostřin (tj. $\pm 0,1$ mm). Dopadající fokusovaný svazek světelných paprsků o dané vlnové délce ohřívá materiál na teplotu tavení, díky tomu se částečně odpařuje a zbytek je odnesen proudem plynů zpravidla směrem dolů (viz obrázek 11). Tím vzniká štěrbička o přibližné šířce paprsku. CNC stroj nesoucí laserovou hlavu pak obkrouží celý obvod součásti. Stejného principu se používá i v případě řezání vnitřních rozměrů. U oceli platí, že lze běžně zpracovávat plechy do tloušťky až 30 mm. Stejně tak je možno zpracovávat i tvarové profily. Pro řezání uhlíkových ocelí se používá kyslíku, čímž vzniká exotermická reakce, ne vzdálená té, objevující se při procesu řezání kyslíkem. U vysokolegovaných ocelí je plynovým médiem dusík. Pro zpracovávání plechů větších tlouštěk se používá plynů na bázi CO_2 .



Obr. 11 Schéma řezání laserem [16]

Mezi hlavní výhody této technologie se řadí možnost rychlého řezu, rozmanitých tvarů. Dále pak možnost takzvaného 3D řezání, to zpravidla znamená, že laserová hlava je buď umístěna ve víceosém CNC stroji, nebo na robotickém rameni, se schopností vysokorychlost-

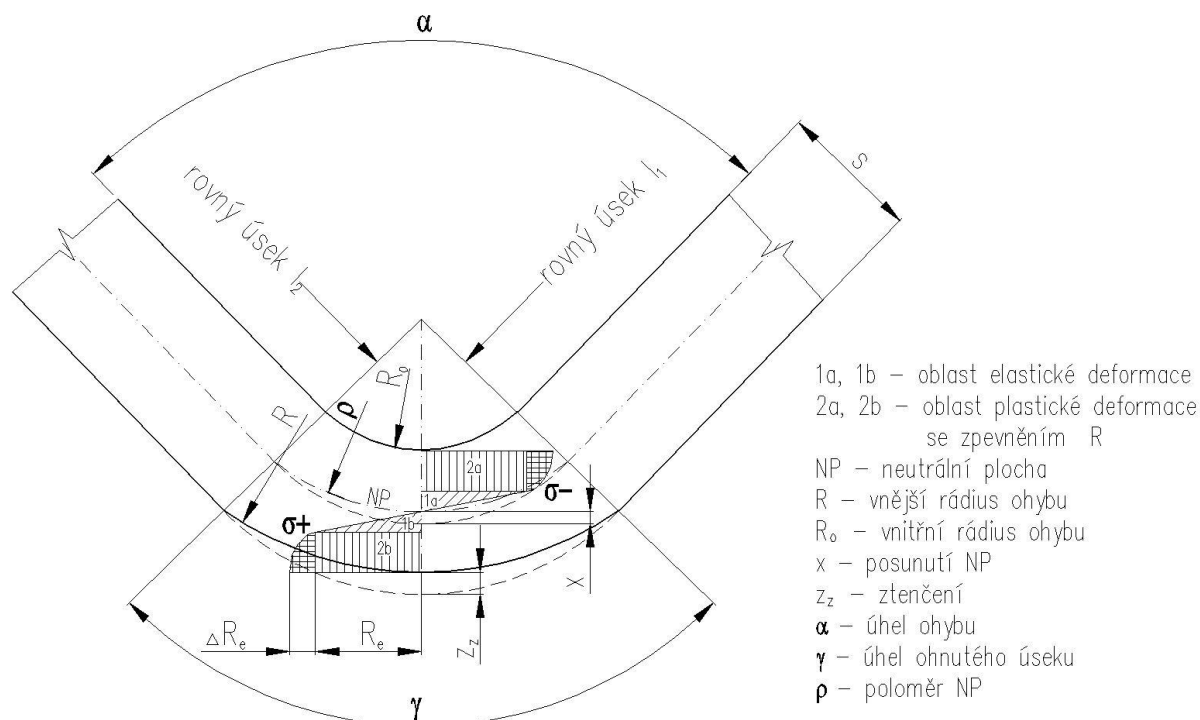


Obr. 10 Plocha řezu (laser) [3]

ní manipulace v limitovaném operativním prostoru. S ohledem na přesnost stroje se dá dosáhnout teoretické rozměrové přesnosti cca 0,05 mm u malých tvarů, běžněji 0,1 mm cca do 1000 mm délky a při vhodném nastavení pracovní posuvové rychlosti hlavy a výkonu stroje i velice jakostního povrchu (viz obrázek 10). Další výhodou je velmi úzká šířka tepelného ovlivnění materiálu od řezu.

2.6 Ohýbání

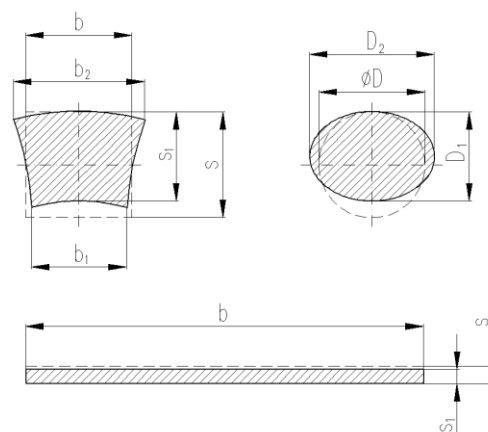
Jedná se o tvářecí proces, u kterého dochází k trvalé deformaci materiálu bez porušení jeho



Obr. 12 Schéma ohýbání [4]

krystalické struktury. Materiál se tedy vlivem působení ohybového momentu od ohýbací síly buď ohýbá, nebo rovná bez výrazné změny plochy průřezu. Díky tomu tato technologie spadá pod plošné tváření.

Při ohýbání dochází v materiálu k posunu neutrální plochy směrem k vnitřní straně ohybu (viz obrázek 12). To je způsobeno silami působícími na vnitřní a vnější vrstvy zpracovávaného materiálu. Zatímco se vnitřní vlákna ohýbaného materiálu stlačují (záporné normálové napětí), vnější vlákna se naopak natahují (kladné normálové napětí), na neutrální ploše dochází tedy ke skokové změně napětí. Z této teorie vychází i fakt, že neutrální plocha je bez napětí a tudíž i bez deformace. Proto je její délka potřebná pro výpočet rozměru výchozího polotovaru ohýbané součásti (viz vzorce 2.13 až 2.23). Stanovuje se zde poloměr neutrální plochy ρ . U úzkých profilů dochází zároveň k deformaci průřezu (viz obrázek 13).

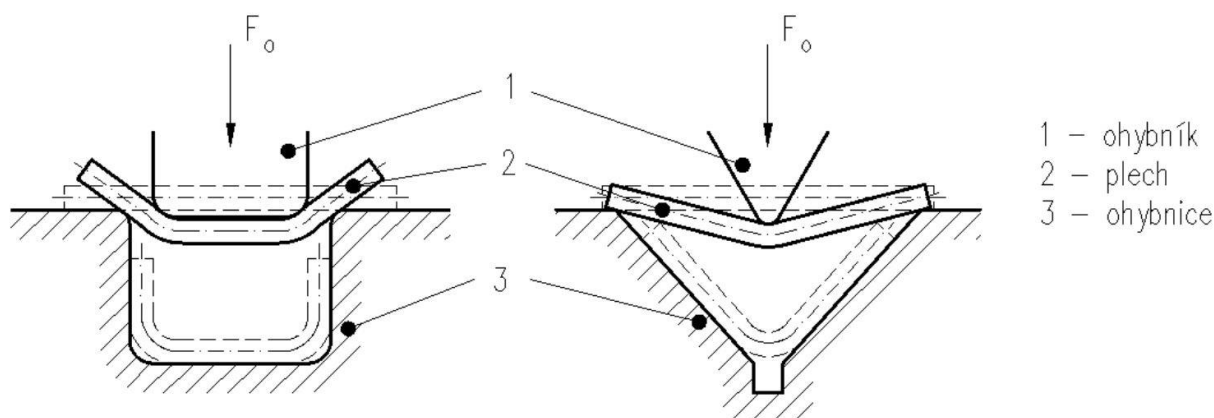


Obr. 13 Změna průřezu ohnutého dílu [4]

Odpružení při ohýbání je způsobeno elastickou deformací, která v tvářeném materiálu nastává dříve než plastická a po odlehčení zatížení způsobí změnu tvaru blíže k původnímu.

Označuje se jako β a závisí na mechanických vlastnostech materiálu, jako tloušťka, koeficient k (viz níže), velikost úhlu ohybu a v neposlední řadě i na konstrukčním provedení tvářecího nástroje. U některých materiálů může dosáhnout i hodnot blízkých 20° . Odpružení lze regulovat několika způsoby, např. zkosením ohybníku o úhel odpružení, zaoblením spodní hrany ohybníku a přidržovače, postupným ohýbáním s odlehčením ohybnice či kalibrováním bočními čelistmi.

Základními způsoby ohýbání materiálu jsou ohýbání do tvaru U a V (viz obrázek 14). Metody jsou popsány podle výsledného tvaru součásti po jednom ohybu. Zatímco V ohyb inkli-



Obr. 14 Schéma ohýbání do tvaru U (vlevo) a V (vpravo) [4]

nuje k písmenu V, u ohybu do tvaru U jsou zhotoveny v podstatě dva ohyby zároveň. U obou typů tváření je výpočet potřebné síly poměrně složitou záležitostí, pro zjednodušení však byl zaveden výpočet ohýbací síly F_o v přibližné podobě (viz rovnice 2.9). Vlivem působení tření na materiál klouzající do ohybnice, je maximální síla zhruba o $1/3$ vyšší než F_o . Dále je nutno připočíst kalibrační sílu působící na ohýbaný materiál (viz vzorec 2.10). Výpočet $F_{o\max}$ se tedy provede dle vzorce 2.11. V případě úpravy čela ohybníku za účelem snížení odpružení se maximální síla ještě navyšuje až o 25 %.

$$F_o = \frac{2 \cdot (1,3 + 0,8 \cdot \varepsilon_c) \cdot b \cdot s^2 \cdot R_e}{3 \cdot l} \quad [N] \quad (2.9)$$

Kde l je vzdáleností podpor ohýbadel, b je šířkou ohýbaného materiálu. Výpočet mezního přetvoření ε_c je prováděn dle rovnice 2.22.

$$F_k = S_o \cdot p \quad [N] \quad (2.10)$$

Kde S_o je kalibrovanou plochou polotovaru v průmětu kolmém na pohyb ohybníku a p měrným tlakem pro kalibrování. Hodnoty, kterých p nabývá, se liší dle zpracovávaného materiálu, např. pro ocel do tloušťky 10 mm se jedná o hodnoty v rozpětí 80 až 150 MPa.

$$F_{o\max} = 1,3 \cdot F_o + F_k \quad [N] \quad (2.11)$$

Ze vzorce 2.12 se pak lze dopočítat k ohýbací práci. Použito je výpočtu $F_{o\max}$, dále pak koeficientu m , který zohledňuje průběh ohýbací síly a dráha reprezentovaná výškou zdvihu ohýbadla h .

$$A_o = m \cdot F_{o\max} \cdot h \quad [J] \quad (2.12)$$

Výpočet rozvinutého rozměru součásti záleží na jejím tvaru, přesněji na velikosti rádia v ohybu, u větších hodnot se přihlíží k jeho relaci vůči tloušťce tvářeného materiálu, tj. koeficient k (viz vzorec 2.13). Dále pak na šířce ohýbaného pásu v poměru k jeho tloušťce.

$$k = \frac{R_o}{s} [-] \quad (2.13)$$

Pro velké poloměry zaoblení, kdy $k \geq 12$, pak platí následující vzorec pro výpočet poloměru neutrální osy (viz vzorec 2.14).

$$\rho = R_o + \frac{s}{2} [mm] \quad (2.14)$$

Naopak pro malé poloměry zaoblení, kdy $R_o \leq 6$, je potřeba použít dalších součinitelů (viz vzorec 2.15).

$$\rho = \left(R_o + \frac{s}{2}\right) \cdot z_z \cdot z_r [mm] \quad (2.15)$$

„Součinitel ztenčení z_z při ohybu závisí na tvárnosti materiálu, stupni deformace, úhlu ohybu a tření materiálu o nástroj.“ [4] Pro odvození obou součinitelů existují grafy (viz obrázek 12) či tabulky vytvořené pro určité podmínky, příkladem budiž tabulka 1, ze které lze vyčíst hodnoty druhého součinitele z rovnice (2.15), tedy z_r .

Tab. 1 Hodnoty součinitele z_r [4]

Šířka ohýbaného dílu b [mm]	1/2s	s	3/2s	2s	5/2s	3s
Součinitel rozšíření z_r [-]	1,09	1,05	1,025	1,01	1,005	1

Pro přesný výpočet obou součinitelů poslouží vzorce 2.16 a 2.17.

$$z_r = \frac{b_1}{b} [-] \quad (2.16)$$

$$z_z = \frac{s_1}{s} [-] \quad (2.17)$$

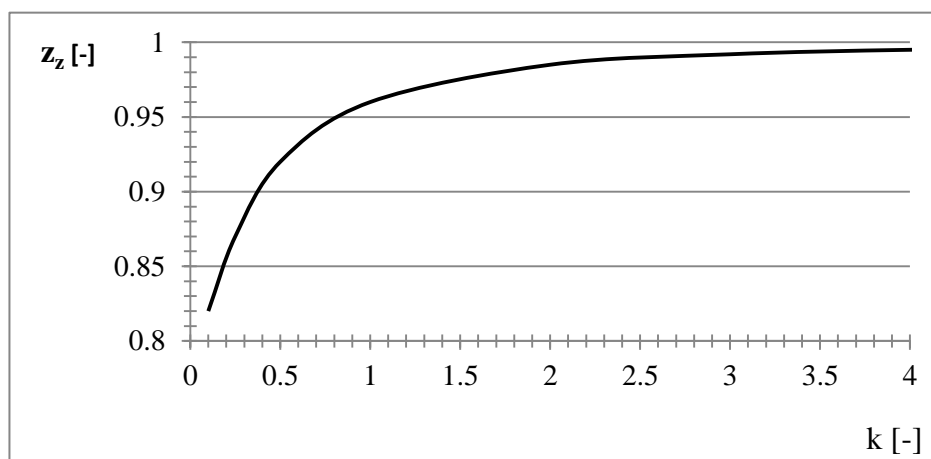
Kde s_1 a b_1 jsou tloušťkou respektive šířkou pásu po ohybu. Při ohýbání širokých pásů plechu se aplikuje pozměněný vzorec (viz 2.18).

$$\rho = R_o + x \cdot s [mm] \quad (2.18)$$

Koeficient x se stanoví na základě závislosti poloměru ohybu a tloušťky plechu (součinitel k). Výběr hodnot, které nabývá x a také hodnot součinitele ztenčení z_z lze vidět v tabulce 2.

Tab. 2 Závislost koeficientu x a z_z na součiniteli k [4]

k	0,1	0,25	0,5	1	2	3
x	0,32	0,35	0,38	0,42	0,445	0,47
z_z	0,82	0,87	0,92	0,96	0,985	0,992



Obr. 15 Součinitel ztenčení při ohýbání měkké oceli o 90° [4]

Pro výpočet délky neutrální plochy oblouku pak slouží následující vzorec.

$$l_o = \frac{\pi \cdot \varphi}{180} \cdot \rho \text{ [mm]} \quad (2.19)$$

Na základě výpočtu neutrální plochy oblouku pak lze snadno získat rozvinutý rozměr ohnuté součásti součtem všech rovných úseků výsledného dílu a všech neutrálních ploch zaoblených úseků (viz vzorec 2.20).

$$l = \sum_{i=1}^n l_i + \sum_{j=1}^m l_{o_j} \text{ [mm]} \quad (2.20)$$

Dalšími z parametrů technologičnosti jsou minimální R_{min} a maximální R_{max} rádia ohybu. „Minimální poloměr ohybu R_{min} závisí na plastičnosti (žíhaný, zpevněný stav) a anizotropii použitého materiálu, na způsobu ohýbání, úhlu ohybu, šířce a tloušťce ohýbaného polotovaru a kvalitě povrchu.“ [4] Pro opakovatelnost a kontrolovatelnost procesu ohýbání je nezbytně nutné realizovat tváření napříč směru vláken ve zpracovávaném materiálu. Pokud u výstřižků nejsou odstraněny ostřiny, je vhodné je zakládat do nástroje, aby byly ostřiny na vnitřní straně ohybu, při něm pak jsou tyto stlačovány. Běžně se používá hodnot R_{min} na úrovni 40 % až 80 % tloušťky materiálu (pro měkkou ocel). V praxi se však minimálním hodnotám poloměru ohybu snaží vyhnout a používají se tak hodnoty bezpečně vyšší, zpravidla o 20 %. Pro přesnější výpočet R_{min} slouží následující vzorec.

$$R_{min} = \frac{s(1-\varepsilon_c)}{2\varepsilon_c} \text{ [mm]} \quad (2.21)$$

Kde ε_c je mezní přetvoření, tj. takové největší přetvoření, při kterém ještě nedojde k porušení vláken. Napětí nepřesáhne R_m a lze říci, že tato hodnota se nejlépe zjistí z tahové zkoušky pro daný materiál. Lze ji však i spočítat (viz vzorec 2.22).

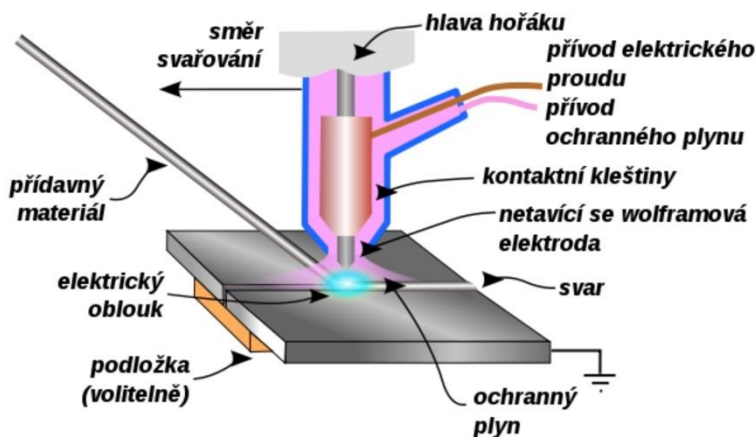
$$\varepsilon_c = \frac{s}{2R_o + s} [-] \quad (2.22)$$

Největší poloměr ohybu R_{max} je naopak takový, při kterém ve vnějších vláknech průřezu materiálu vznikne při tváření plastická deformace. V případě elastické deformace se polotovar po odlehčení zatížení narovná do původního tvaru. Pro výpočet slouží vzorec (2.23).

$$R_{max} = \frac{s}{2} \left(\frac{E}{R_e} - 1 \right) \text{ [mm]} \quad (2.23)$$

2.7 Svařování

Svařování je způsobem výroby nerozebíratelných spojení, užitím tepelné, mechanické, radiační energie nebo jejich kombinací. Vzniká působením meziatomových sil a adhezních vazeb na kontaktních plochách, jež byly aktivovány teplem nebo tlakem. Z důvodu potřeby svařovat různé materiály v různých dávkách bylo postupně vyvinuto několik různých technologií. Základním dělením lze rozlišit svařování na tavné a tlakové. Zásadním



Obr. 16 Svařování TIG [13]

rozdílem je právě způsob aktivace kontaktních ploch, jak již název napovídá, u tavného svařování působí termická energie, zatímco u tlakového mechanická či radiační. V obou případech však musí být překonána potenciální energie spojovaných ploch. Existují různé druhy svarů dle přípravy spojovaného materiálu, dále pak svařovací polohy a techniky svařování.

U tavné metody vzniká svar přívodem tepelné energie do oblasti svaru, tím dochází k natavení základního i přídavného materiálu. Tekutá oblast pak při tunutí získává krystalickou strukturu, čímž dochází k pevnému spojení. Okolo svaru vzniká tepelně ovlivněná oblast, tj. pásmo, kde došlo k částečné překryštalizaci. Do této skupiny se řadí svařování elektrickým obloukem, elektrostruskové, plazmové, plazmové MIG, magneticky ovládaným obloukem, elektronové, plamenové, slévárenské, světelným zářením, laserové, aluminotermické, elektroplynové a indukční.

Naopak působením mechanické energie dochází k makro či mikro deformaci povrchů spojovaných materiálů u tlakového svařování. Výsledkem je přiblížení obou materiálů na vzdálenost menší působení meziatomových sil, jejichž vlivem vzniká spojení do pevné krystalické mřížky. Pro snížení energetické náročnosti se používá ohřevu pod teplotu tavení. Do této skupiny patří talové svařování za studena, odporové, třecí, ultrazvukové a výbuchové.

Obloukové svařování netavicí se wolframovou elektrodou (viz obrázek 16) probíhá v inertní ochranné atmosféře plynu o vysoké čistotě (99,995 %). Pro toto svařování se užívá argon, helium nebo jejich směsi. Lze jej provádět s přídavným materiálem ve formě drátu a to buď s ručním vnášením, nebo automatizovaným přívodem ve formě podavače. Svařování elektrickým obloukem lze dále dělit dle vstupního proudu. Na obrázku (viz obrázek 17) lze vidět svařovací zdroj a hořák, jež se k obloukovému svařování používají.

Střídavého proudu se používá na svařování hliníku a jeho slitin a hořčíku. Stejnosměrného naopak pro středně či vysokolegovanou ocel, měď, nikl, titan, zirkon a molybden. Třetí variantou je pak impulzní svařování, kdy dochází k impulzům stejnosměrného proudu v určité frekvenci. Metoda TIG se používá i pro svařování uhlíkové oceli, ovšem méně často, s ohledem na možný vznik pórů. Výhodou tohoto způsobu svařování je možnost spojování různých materiálů. Díky kvalitě vzniklých svarů je svařování TIG stále častěji užívané.

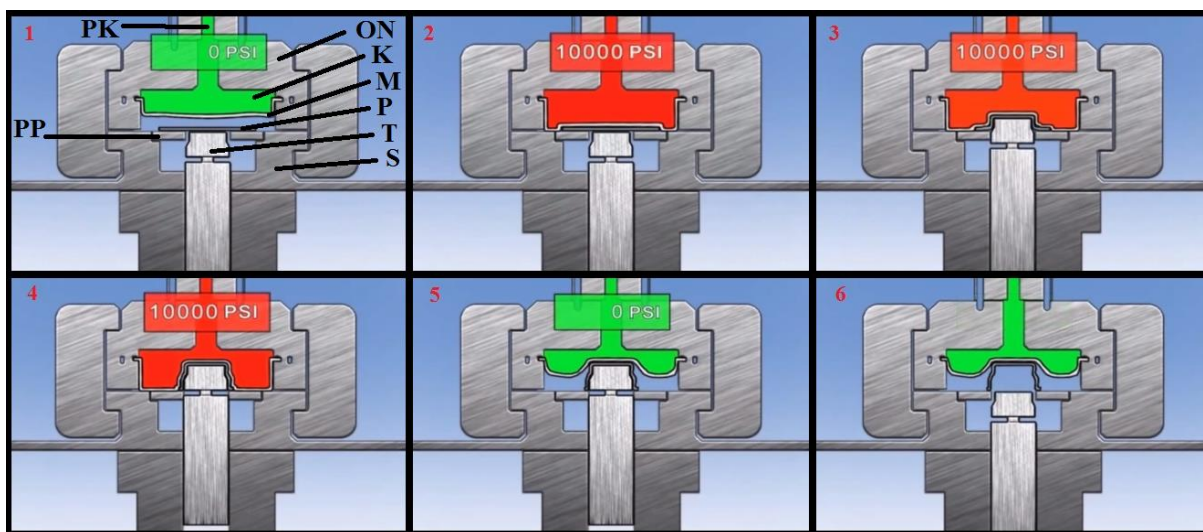


Obr. 17 Svařovací zdroj a hořák pro TIG svařování výrobce Fronius [9]

3 NÁVRH TECHNOLOGIE VÝROBY [8, 10, 12]

3.1 Možnosti výroby součástí

Původním záměrem zákazníka, potažmo jeho konstrukčního týmu, bylo vyřezání plechu laserem a jeho další zpracování pomocí tváření kapalinou, konkrétně varianty hydroform. Jedná se o způsob tažení, kdy tažník jako pevný spodní nástroj působí na zpracovávaný materiál. Horním nástrojem je tažnice, která je tvořena nádobou plnou kapalinou. Tato je vůči materiálu oddělena membránou, do které tažník plech tvaruje, oporou mu je právě kapalina pod konstantním vysokým tlakem (viz obrázek 18). Obrovskou výhodou použití hydroformu je možnost realizovat celý proces v menším počtu operací a s poměrně stabilními výsledky kvality výrobku. Na druhou stranu je nutné vytvořit pevný tažník pro každou konkrétní součást.

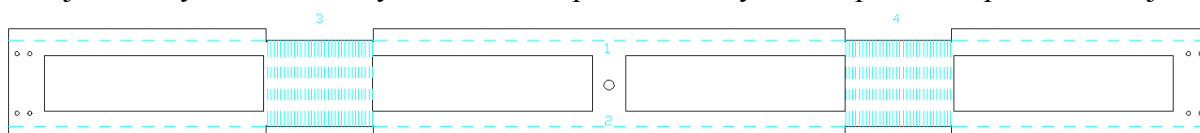


Popis obrázku: PK - přívod kapaliny, ON - ocelová nádoba, K - kapalina, M - membrána, P - plech, PP - pevný přidržovač, T - tažník, S - stůl lisu.

Obr. 18 Obecný postup tváření metodou hydroform [15]

Jak bylo předestřeno výše, výroba celé soustavy krytů by tak potřebovala hned několik různých tažníků. S ohledem na nízkou sériovost bylo vhodné najít alternativní řešení. Dále rozhodl také fakt, že firma Exerion PTO, zabývající se o tuto zakázku, tažnými lisami nedisponuje.

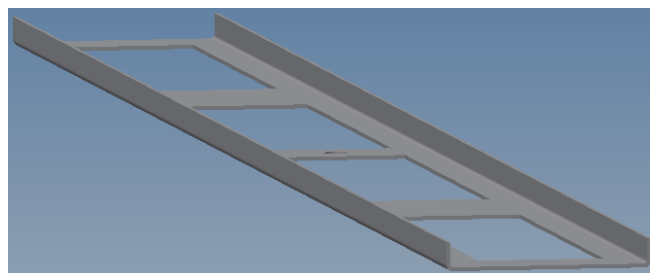
První alternativa navržená právě zmíněnou firmou, spočívala ve stejném získání polotovaru pro další zpracování, tedy řezáním laserem. Následovalo však ohýbání na ohraňovacím lisu. Výchozí myšlenka spočívala v ohýbání součásti dle schématu (viz obrázek 19), kdy by se jednotlivé ohyby realizovaly v pořadí 1 – 30. Ohyby č. 1 a 2 jsou běžnými V ohyby do úhlu 90°, zatímco u č. 3 a 4 dochází k postupným ohybům, kdy je ve vzájemné vzdálenosti přibližně 4 mm realizována celá řada ohybů, každý ve velmi malém úhlu (177°). Ve svém výsledném tvaru dle programu měly zajistit rádius 80 mm. Velkým příkořím pak byl fakt, že v jednotlivých krocích ohýbání č. 3 a 4 probíhalo ohýbání U profilu napříč ke stávajícím



Obr. 19 Pořadí ohybů na rozvinutém tvaru (1-30)

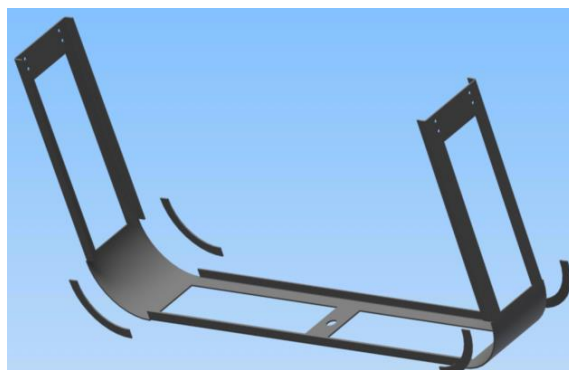
ohybům (viz obrázek 20 po ohybech č. 1 a 2). Nově vzniklý tvar s vnitřním rádiem 80 mm má mít celkový úhel 91°. Vlastně se nejednalo přesně o rádius ale několik ploch, které svým výsledným tvarem byly k rádiu velmi blízké. Obecně lze takový způsob ohybu použít, je však vhodný pro tupé úhly velkých hodnot. Čím blíže přímému úhlu, tím je menší vzniklá defor-

mace, tzv. „zvlnění“, na bočních tvarech U profilu. Pro představu bylo provedeno experimentální zpracování postupným ohýbáním v nástrojích na V ohyb, kdy úhel ohybu byl volen na 177° a bylo provedeno několik ohybů, z nichž sousední byly od sebe vzdáleny právě 4 mm. Už při celkovém úhlu přibližně 140° bylo zřejmé výrazné vychýlení bočních lemů směrem ven z U tvaru a bylo tak velmi pravděpodobné, že tato varianta nebude použitelná ani v případě tvorby speciálního ohýbacího nástroje. Jeho boční vedení by mělo za úkol v dané operaci přidržit strany U profilu ve správné pozici a jakýmsi způsobem kontrolovat zvlnění bočních lemů.



Obr. 20 Součást po prvních 2 ohybech

Na základě výše zmíněných poznatků došlo k návrhu dalšího řešení. Jeho podstatou bylo rozdělení součásti na 2 různé části, kde menší část (plochý díl, číslo výkresu 137122249) bude užita 4 krát, zatímco větší díl (hlavní, č. výkresu 137122248) bude použit jednou (viz obrázek 21). Základním procesem tvorby rozvinutých tvarů bylo opět řezání laserem. Výroba dále pokračovala ohnutím dílu 137122248. Následovalo poskládání jednotlivých částí a svaření pomocí tavného obloukového svařování metodou TIG. Zde bylo od začátku zřejmé, že pro správné umístění jednotlivých pozic k výrobě součásti splňující toleranční pole jednotlivých rozměrů, bude nutné užít svařovacího přípravku. Poslední operací zpracování součásti pro docílení zamýšleného tvaru bylo broušení hrany vzniklé svarem, aby co nejlépe korespondovala se zaoblením ohýbané části U profilu. Z výše zmíněných technologií byla vybrána k výrobě tato, kterou se dále bude zabývat bakalářská práce.



Obr. 21 Model rozdělení součásti

Obecným problémem zakázky byla nemožnost navrhovat či realizovat změny přímo potřebné pro úpravu technologie výroby. Tento trend však reflektuje poměrně běžný neduh v reálném provozu strojírenského průmyslu, když není konstruktér zakázky ve stejné firmě, kde následně probíhá sériová výroba daných součástí. Jedinou výhodou tak zůstalo, že zatímco zákazník trval na vnějším vzhledu a funkčnosti součásti, vše ostatní mohlo být předmětem případné budoucí změny. Tato možnost pro Exerion byla otevřená pouze v případě důkazu vyrobitelnosti dané součásti. Proto bylo potřeba realizovat jisté drobné úpravy, které nenarušily výše zmíněná specifika přímo v prototypové výrobní dávce čítající 3 až 5 kusů.

3.2 Materiál

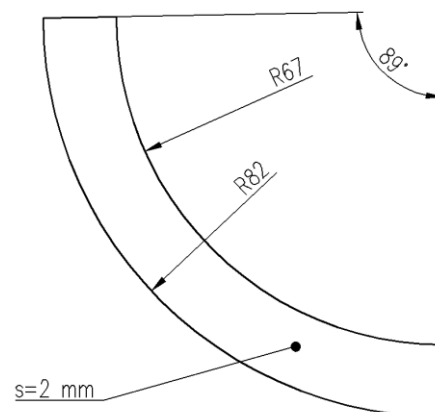
Celý kryt je na základě požadavku zákazníka vyroben z uhlíkové oceli S235JR. Jedná se o obvyklou konstrukční ocel třídy 11. Nelegovaná ocel 11 375 je optimální volbou pro svou dobrou až zaručenou svařitelnost. Tento materiál se ve strojírenství používá pro dynamicky i staticky namáhané součásti strojů a konstrukce středních tloušťek, které jsou tavně svařované. Její chemické složení je k dispozici níže v tabulce 3. Tato ocel se vyznačuje dobrou houževnatostí, která napomáhá její dobré tvářitelnosti. Mechanické vlastnosti materiálu jsou pro dané užití dostačující. Mez pevnosti R_m se pohybuje mezi 340 – 470 MPa, horní mez kluzu R_{eH} na hranici 235 MPa.

Tab. 3 Chemické složení oceli 11 375 (hmotnostní procento) [10]

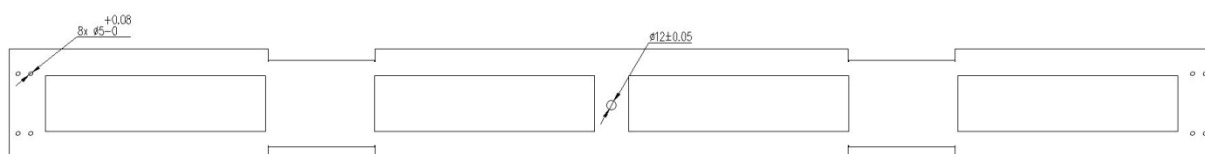
C	P	S	N
max 0,17	max 0,045	max 0,045	max 0,009

3.3 Rozdělení původní součásti

Jak již bylo zmíněno, výroba součásti ve svém původním tvaru není realizovatelná vybranými technologiemi, proto muselo nejprve dojít ke vhodné separaci na jednotlivé díly. Rozdělení se provedlo tak, aby ve velkém ohybu (rádius 80 mm) byla součást odlehčena o lem. Ten by jinak vlivem tvářecích sil dostal výrazné nežádoucí deformace, jejíž následné odstranění není možné. Původní myšlenka předpokládala, že výsledný rozměr U profilu (tj. 106 mm) bude dosažen ve zmíněném místě ponecháním šířky pásu o velikosti 102 mm na základní součásti 137122248 (viz obrázek 23) a zároveň zhotovením plochých částí lemů z materiálu o stejné tloušťce jako zbytek součásti, tj. 2 mm. Tyto pásy (č. 137122249) budou mít tvar výsledného ohybu, což znamená vnější rádius 82 (vznikl sečtením 80 mm rádia ohybu a 2 mm tloušťky plechu) a vnitřní rádius 67 mm (naopak odečtením 15 mm kýžené výšky lemu od vnějšího rádia). Celkový rozměr pak bude vymezen právě doplněkem do přímého úhlu ke kýženým 91° (viz obrázek 22).



Obr. 22 Plochá část lemu (díl 137122249)



Obr. 23 Rozvinutý tvar dílu 137122248

3.4 Technologický postup

Vstupním polotovarem do celého procesu výroby součásti 137322191 je plechová tabule malého formátu, tj. 2000 x 1000 mm. Z ní se vyřeže rozvinutý tvar obou dílů v množstevním poměru 1 ks dílu 137122248 ku 4 kusům 137122249. Na základním dílu 137122248 se však nejprve (tzn. před řezáním) ve stejném stroji vystříhnou přesnými nástroji všechny kruhové

Tab. 4 Předpokládaný technologický postup a odhadnuté normohodiny

Číslo operace	Popis operace	Stroj	Nástroj	Seřizovací čas [h/ks]	Výrobní čas [h/ks]	Seřizovací list	Program
10	Uzavřené stříhání	Trumpf TC600L	kruhový ø 5 kruhový ø 12,05	0,5	0,018	ANO	ANO
20	Řezání laserem	Trumpf TC600L	N/A	N/A	0,01	ANO	ANO
25	Odjehlení	N/A	N/A	0,083	0,042	-	-
30	Ohýbání	Trumpf TrumaBend V85X	horní OW202 spodní EV004	0,5	0,372	ANO	ANO
40	Svařování TIG	Fronius TransTig 4000	N/A	0,5	0,333	-	-
50	Broušení	pásová bruska	N/A	0,25	0,5	-	-

díry. Dále proběhne odjehlení hran a součást 137122248 bude ohnuta. Posledním krokem pro výrobu dílu 137322191 bude svaření všech součástí v přípravku.

3.5 Řezání a stříhání plechu

První operací dílu číslo 137122248 je vystříhnutí kruhových děr, následovně vyřezáním zbývajících kontur. V případě malého dílu č. 137122249 se jedná pouze o vyřezání kontury. Obě operace budou probíhat na stroji Trumpf TC600L (viz obrázek 24), který kombinuje řezání laserovým



Obr. 24 Kombinovaný laser Trumpf TC600L [7]

paprskem spolu s uzavřeným stříháním přesnými nástroji. Střížná síla stroje je 220 kN, výkon 3 kW a teoreticky dokáže zpracovávat plech o tloušťce až 8 mm. Dále disponuje nástrojovým zásobníkem s až 18 pozicemi, pro automatickou výměnu v průběhu procesu. Tento stroj však má již odpracováno několik set tisíc hodin, proto je jeho reálný výkon poněkud nižší. Ve skutečném provozu se na něm již nezpracovávají běžné oceli tlouštěk větších než 5 mm.

Exerion PTO nakupuje tyto nástroje od dvou dodavatelů, jedním z nich je přímo výrobce stroje, druhým pak Top Lantis s.r.o. Nezbytným příslušenstvím takového strojového parku je i ostříčka nástrojů, která v Exerionu také nechybí. Pro vystříhnutí bude použito standardních nástrojů systému Trumpf od výše zmíněného výrobce. Konkrétně kruhový horní nástroj velikosti 0/A o průměru 5,03 mm (objednací č. 107A01) a velikosti I o průměru 12,05 mm (obj. č. 101111). Spodním nástrojem pro oba střížníky bude kruhová matrice o velikosti I a o průměrech 5,43, respektive 12,45 mm (díky střížné vůli, viz níže). Všechny tyto nástroje jsou shodou okolností již ve firmě používány, takže je není nutno objednávat speciálně pro výrobu této zakázky. Seřizovací list i program pro výrobu obou dílů na tomto stroji byly vytvořeny, aby jeden program zahrnoval výrobu obou dílů oběma procesy (řezání i stříh).

Pro zjištění střížné vůle se použije vzorce 2.7. Dále pak se vypočítá střížná síla (dle vzorců 2.1 až 2.5) pro jednotlivé tvary. Jelikož se stříhá pouze jedním nástrojem v jednu chvíli, není nutno pro výpočet nejvyšší potřebné síly jednotlivé prvky sečítat, stačí pouze zvolit tu větší hodnotu z vypočtených sil F_{s1max} (pro kruhovou díru o průměru 5 mm) a F_{s2max} (pro kruhovou díru o průměru 12 mm). Tu pak je třeba porovnat se střížnou silou, kterou je stroj schopen vyvinout, pro ověření vyrobitelnosti. Pro výpočet práce se použije vzorce 2.6, kde však už bude sečteno všechno stříhání dohromady, aby se jednalo o celkovou práci.

$$v = 0,32 \cdot 0,012 \cdot \sqrt{470 \cdot 0,8} = 0,12 \text{ [mm]}$$

Ve firmě Exerion PTO se však volbu střížné vůle pro stroj TC600L stanovuje u běžné oceli jinak. Výchozí vůle je stanovena na 0,2 mm pro materiály pro běžnou ocel do tloušťky 1 mm a dále se s každým 0,5 milimetrem tloušťky plechu přidává jedna desetina milimetru vůle.

$$\tau = 0,8470 = 376 \text{ [MPa]}$$

$$F_{s1} = 376 \cdot 31,42 \cdot 1,3 = 15358,1 \text{ [N]} = 15,4 \text{ [kN]}$$

$$F_{s2} = 376 \cdot 75,4 \cdot 1,3 = 36855,5 \text{ [N]} = 36,9 \text{ [kN]}$$

$$S_{s1} = 5.2 \cdot \pi = \underline{31,42 \text{ [mm}^2\text{]}}$$

$$S_{s1} = 12.2 \cdot \pi = \underline{75,4 \text{ [mm}^2\text{]}}$$

$$F_{s1_{max}} = 1,3.15358,1 = 19965,5 \text{ [N]} = \underline{20 \text{ [kN]}}$$

$$F_{s2_{max}} = 1,3.36855,5 = 47912,2 \text{ [N]} = \underline{47,9 \text{ [kN]}}$$

Z výpočtů maximální střížné síly je zřejmé, že bude potřeba užít až 47,9 kN pro stříhání kruhových děr. Jelikož kombinovaný laser Trumpf TC600L dokáže vyvinout sílu až 220 kN, součást 137122248 lze na daném stroji bez problémů vystříhnout.

$$A_s = \frac{(8.15358,1 + 36855,5) \cdot 2.1 \cdot \pi}{2} = 501776,1 \text{ [J]} = \underline{501,8 \text{ [kJ]}}$$

Celková střížná práce vykonaná při stříhu všech kruhových děr (tj. 8x průměr 5 mm a 1x průměr 12 mm) je rovna 501,8 kJ.

Z výčtu technologičnosti dané součásti je potřeba snad zmínit minimální průměr děr. V případě kruhových je nejmenší o průměru větším (dokonce více než dvojnásobně) oproti tloušťce plechu. Problém není ani ve vzdálenosti děr mezi sebou či od okraje materiálu. U všech pozorovaných parametrů je bezpečně (násobně) překročen požadavek na minimální vzdálenost či rozměr prvku. Pro výpočet rozměrů rozvinutého tvaru je nutno aplikovat poznatky z kapitoly 2, konkrétně vzorce 2.11 – 2.21 a upravit je podmínkám řešené součásti. V následujících kalkulacích bude zjištěna délka rozvinutého tvaru (l_d) a také jeho šířka (l_s).

$$l_d = 2 \cdot l_1 + 2 \cdot l_o + l_2 \text{ [mm]}$$

$$l_s = 2 \cdot l_3 + 2 \cdot l_{o8} + l_4 \text{ [mm]}$$

Kde l_1 a l_2 odpovídá rovným úsekům (viz obrázek 25) a l_o je délka neutrální plochy v oblouku ohybu. Pro zjištění konkrétních hodnot bude použito následujících výpočtů, do kterých se dosadí rozměry z výkresu součásti.

$$l_1 = \frac{387 - 80,6}{\cos 1^\circ} = \frac{306,4}{\cos 1^\circ} = \underline{306,45 \text{ [mm]}}$$

$$l_2 = 560,7 \text{ [mm]}$$

$$k_{80} = \frac{80}{2} = \underline{40 \text{ [-]}}$$

$$\rho_{80} = 80 + \frac{2}{2} = \underline{81 \text{ [mm]}}$$

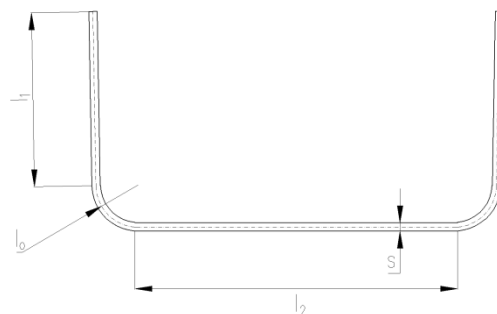
$$l_o = \frac{2\pi\rho_{80} \cdot 89}{360} = \frac{2.81.89 \cdot \pi}{360} = \underline{125,82 \text{ [mm]}}$$

$$l_d = 2.306,45 + 2.125,82 + 560,7 = \underline{1425,24 \text{ [mm]}}$$

Dosazením do rovnic 2.13 až 2.15 se vypočítá poloměr neutrální plochy pro šířku rozvinu:

$$k = \frac{1,9}{2} = \underline{0,95 \text{ [-]}}$$

$$\rho = 1,9 + 0,41.2 = \underline{2,72 \text{ [mm]}}$$



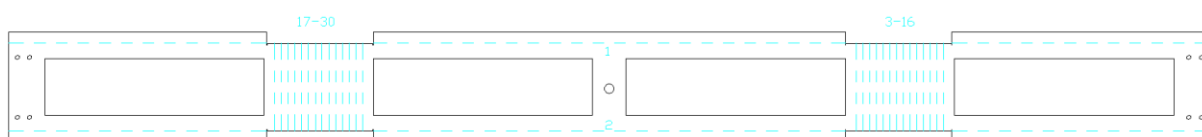
Obr. 25 Označení úseků pro výpočet délky rozvinutého tvaru součásti

$$l_{o\delta} = \frac{\pi \cdot 90}{180} \cdot 2,72 = 1,36\pi = \underline{4,273 [mm]}$$

$$l_s = 2,11,2 + 2,4,273 + (106 - 2,1,9) = \underline{125,82 [mm]}$$

3.6 Ohýbání součástí

Vyřezaný plech se dále zpracovává na ohraňovacím lisu. Jelikož jsou stroje firmy Trumpf různě dimenzované i staré, pro sériovou výrobu bude potřeba vytvořit seřizovací listy a programy operací pro každý stroj zvlášť. Testovací série bude prováděna na stroji TrumaBend V85X (viz obrázek 27), který je schopen působit na zpracovávaný materiál silou 850 kN. Délka nástrojové lišty je 2050 mm, což znamená nutnost rozdělit ohýbání součástí na 2 operace, mezi nimiž proběhne výměna nástrojů v jednotlivých stanovištích. Proto bude celá vý-



Obr. 26 Postup ohýbání

robní dávka součástí v sériové výrobě vždy nejdříve rozpracována, aby po výměně stanovišť mohla být dokončena.

Nejprve proběhne ohyb celého lemu na jedné i druhé straně, tj. ohyb č.1 a 2 (viz obrázek 26), dále pak postupným ohýbáním vytvoření tvaru velice blízkého rádiu o velikosti 80 mm. Již při tvorbě ohýbacího programu však v software Tops zahlásil kolizi ohýbaného dílu se strojem. Na jejím schématu (viz obrázek 28), kde jsou ukázány 3 z celé škály ohybů, aby bylo zřejmé, kde se tato metoda výroby zastavila. Výsledkem tedy bylo nezbytně nutné opětovné přehodnocení návrhu technologie součástí.



Obr. 27 Ohraňovací lis Trumpf TrumaBend V85X

Zajímavým výstupem této praktické zkoušky však bylo zjištění, že postupnými ohyby dochází při nastavení stejných parametrů u stejné výrobní dávky získané řezáním z jedné plechové tabule, k velmi nestabilním výsledkům. Celkový úhel dosaženého tvaru ve skutečnosti mezi jednotlivými zpracovanými kusy se pohyboval přibližně v rozmezí 80° až 105°.

Ohýbání dvou V ohybů, kterými se vytvoří boční lemy součástí, je nutno prověřit s ohledem na minimální poloměr ohybu použitím vzorců 2.10 a 2.11.

$$R_{min} = \frac{2(1 - 0,34)}{2,0,34} = \underline{1,94 [mm]}$$

$$\varepsilon_c = \frac{2}{2,1,9 + 2} = \underline{0,34 [-]}$$

$$F_o = \frac{2 \cdot (1,3 + 0,8 \cdot 0,34) \cdot (1425,24 - 2 \cdot 125,82) \cdot 2^2 \cdot 376}{3 \cdot 12} = 154151 [N] = \underline{154,2 [kN]}$$

Minimální poloměr ohybu je z výpočtu 1,94 mm, což znamená, že požadovaného rádia ohybu 1,9 mm, by mělo být dosaženo v jeho tolerančním poli. Pro ohýbání dvou ohybů tedy bude použito horního nástroje OW202 a spodního nástroje EV004 v celkové délce 1500 mm. Pro části, kde nemají být tyto ohyby (tj. oblast postupného ohýbání č.3 a 4), není nutno vynechávat nástroje, jelikož se v těchto místech materiál při ohybu neopře z obou stran o spodní nástroj a pouze se vytočí dovnitř do V tvaru nástroje. Vypočtená ohýbací síla je pak navýšena o tření.

$$F_k = (1425,24 - 2 \cdot 125,82) \cdot 0,5 \cdot 2 \cdot 80 = 93888 [N] = \underline{93,8 [kN]}$$

$$F_{o_{max}} = 1,3 \cdot 154151 + 93888 = 294284 [N] = \underline{294,3 [kN]}$$

Maximální síla, kterou je stroj schopen vyvinout (tj. 850 kN) výrazně přesahuje maximální sílu potřebnou k ohybu do tvaru V. Pro postupné ohýbání za účelem vytvoření celkového ohybu 91° o rádiu 80 mm, je nutno vypočítat maximální poloměr ohybu dle vzorce 2.12.

$$R_{max} = \frac{2}{2} \left(\frac{2,05 \cdot 10^5}{235} - 1 \right) = \underline{871 [mm]}$$

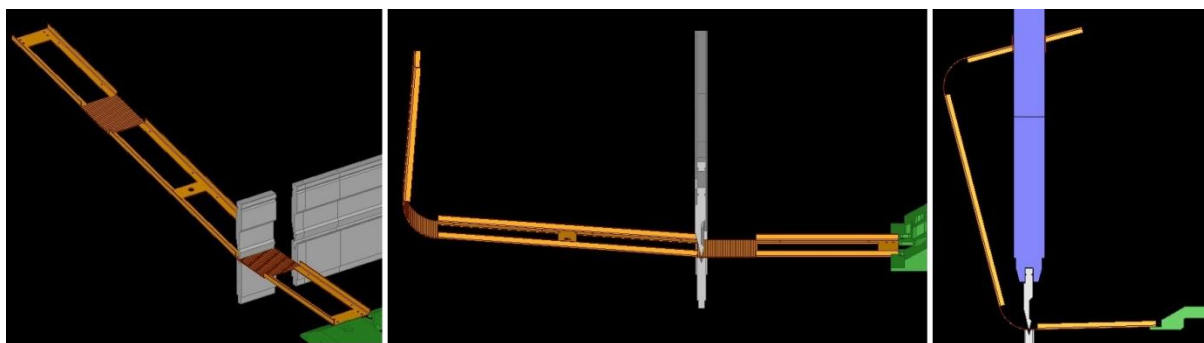
V prvním a posledním kroku postupného ohýbání dochází k ohybu do úhlu 178,5°, ve všech dalších pak jde o úhel 177°. Celkem se jedná o 32 ohybů.

3.7 Změna technologického postupu

Na základě negativních výstupů z ohýbání bylo nutné hledat nové řešení výrobního procesu součástí. První alternativou bylo použití zakružovačky pro rádius 80 mm. Tento směr ubírání byl nakonec označen za slepou uličku a byla vytvořena dvě nová potencionální řešení.

První možností bylo rozdělení velkého dílu na další dvě asymetrické části, které by po ohybu byly svařeny. Tato varianta byla velmi jednoduchá a zákazníkem akceptována za přípustnou. S ohledem na nestabilitu krokového svařování však byla pouze experimentálně realizována v dávce 3 kusů, kde se opět potvrdila nemožnost reálně řídit postupové ohýbání za účelem zisku kýženého rozměru.

Druhou možností, kterou se nakonec i Exerion PTO vydal, byla konstrukce a výroba speciálního ohýbacího nástroje k dosažení rádia 80 mm v jedné lisovací operaci. Šlo o návrh nástroje, pokud možno v takové podobě, aby bylo možno jej vyrobit svépomocí, ověřit jeho funkci a v případě potřeby zadat výrobu sofistikovanější varianty osvědčenému dodavateli. Firma se rozhodla pro tuto verzi, kvůli krátkému se časovému fondu zbývajícimu k datu expedice první ověřovací série zákazníkovi. Druhým hybatelem pak byl fakt, že se tím chtěl



Obr. 28 Vybrané fáze ohýbání dílu 137122248 postupnými ohyby a vznik kolize

přesvědčit o funkci zkonstruovaného nástroje před objednáním uceleného řešení. V případě špatné konstrukce by drahý nástroj nenašel uplatnění.

Nově se tedy technologický postup mírně změnil, poměrně výrazně se zkrátil čas ohýbání (cca o 90 %), ovšem hlavním cílem byla jednoznačně opakovatelnost procesu (viz tabulka 5).

Tab. 5 Opravený technologický postup

Číslo operace	Popis operace	Stroj	Nástroj	Seřizovací čas [h/ks]	Výrobní čas [h/ks]	Seřizovací list	Program
10	Uzavřené stříhání	Trumpf TC600L	kruhový ø 5 kruhový ø 12,05	0,5	0,018	ANO	ANO
20	Řezání laserem	Trumpf TC600L	N/A	N/A	0,01	ANO	ANO
25	Odjehlení	N/A	N/A	0,083	0,042	-	-
30	Ohýbání	Trumpf TrumaBend V85X	horní OW202 spodní EV004	0,5	0,036	ANO	ANO
40	Svařování TIG	Fronius TransTig 4000	N/A	0,5	0,333	-	-
50	Broušení	pásová bruska	N/A	0,25	0,5	-	-

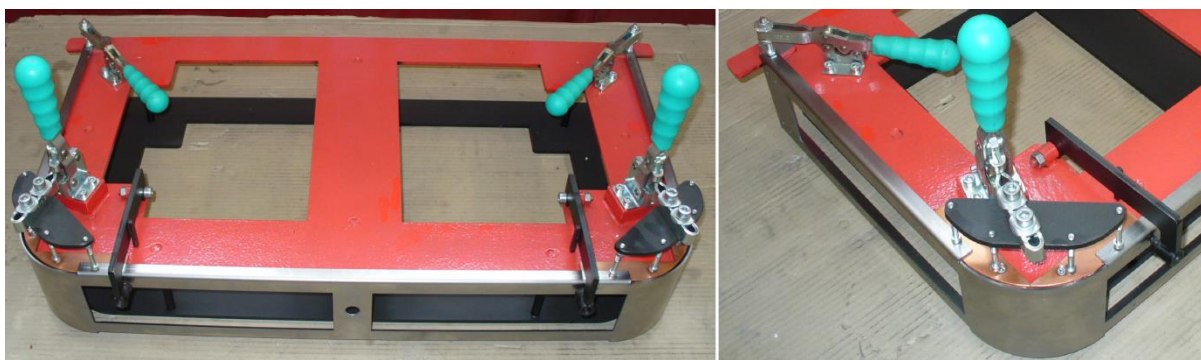
3.8 Svařování a broušení součástí

Výroba součástí, aby plnila funkci, pro kterou byla původně navržena, musela být dokončena svařením jednotlivých dílů, tj. 1 ks 137122248 a 4 ks 137122249, do jednoho celku (č. dílu 137322191). Pro tento proces byla zkušeným svářečem firmy Exerion PTO navržena konstrukce přípravku č. 22191. Pro firmu tento svářeč působí i jako externí dodavatel přípravků a to jak manipulačních, tak svářecích, pro lety osvědčenou vysokou úroveň kvality dodávaných řešení.

Svařovací přípravek (viz obrázek 29) plní dvojí funkci. Jednak pomáhá zajistit „doladění“ tvaru dílu 137122248 ke kýženému výsledku (viz detail obrázku 32) a dále pak přidržuje díly 137122249 ve správných pozicích po celý průběh svařování. Takovým pomocným a pro svařování ne nedůležitým účelem je lepší odvod tepla vzniklého při svařování pomocí měděných tepelných kontaktů a vodičů z mědi. Výsledkem byla minimalizace změny rozměrů a úhlů dílu 137322191 po jeho svaření a vyjmutí z přípravku. Zároveň tím byla výrazně zvýšena stabilita celého výrobního procesu.



Obr. 29 Svařovací přípravek č. 22191



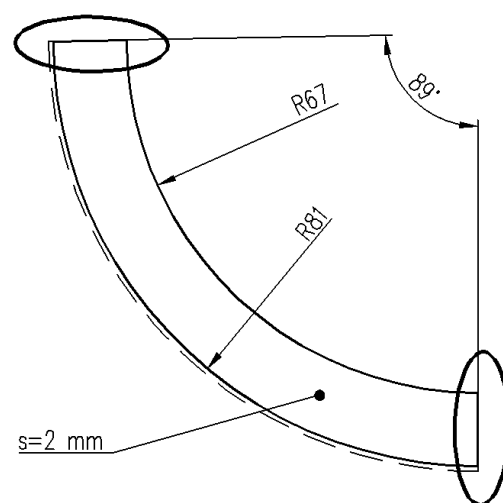
Obr. 32 Přípravek č. 22191 s dílem 137322191 a detail upnutí (vpravo)



Obr. 30 Změna přiložení dílu 137122249 za účelem snížení nákladů na broušení

Samotné svařování pak probíhá ve dvou částech. Po vložení a upnutí dílu 137122248 následuje upnutí jednotlivých kusů dílu 137122249. Následuje zafixování ve správné pozici drobnými švovými sváry. Dále jsou zavařeny všechny zamýšlené sváry do své konečné podoby, aby kompletně spojily všechny díly.

Broušení svarku 137322191 probíhá na stacionární pásové brusce Fein o šířce pásu 75 mm a jedná se zejména o zabroušení vnějšího poloměru na hodnotu 4 mm. V původním záměru nebylo uvažováno s jakýmkoli speciálním přípravkem pro upnutí dílu při broušení a spoléhalo se výhradně na um a zkušenosti osvědčeného brusíče. V průběhu svařování a broušení pak vznikl společnou diskuzí dělníků a vedoucího týmu nápad na drobnou úsporu času další úpravou součásti 137122249. Nově bude v oblasti tvorby rádia 80 mm zkrácena o polovinu tloušťky plechu, tj. o 1 mm. Bude tedy doléhat na protikus 137122248 jiným způsobem. Detail je na obrázku (viz obrázek 30), kde je nalevo vidět původní řešení vč. naznačeného tvaru po zabroušení, zatímco napravo je návrh na nový způsob spojení. Kromě očekávané úspory času vyplývají z této úpravy i nižší



náklady na spotřební brusný materiál. Dle odhadů z náčrtu situace by měla celková úspora broušení činit přibližně 50 % původních hodnot. Správná poloha dílů 137122249 v relaci k dílu 137122248 bude i při tomto způsobu dosednutí zajištěna, a sice doražením na konce lemů, které vymezují ohyb o poloměru 80 mm (viz zakroužkovaná oblast na detailu obrázku 31).

Obr. 31 Náčrt úpravy dílu 137122249 s

označenými hranami pro zajištění pozice

4 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ NÁSTROJE

4.1 Návrh ohýbacího nástroje

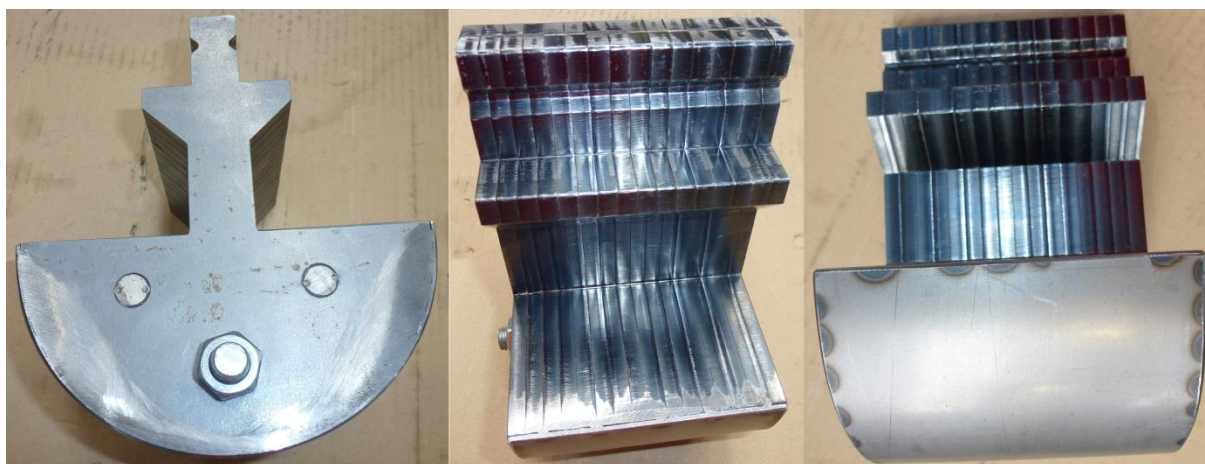
Záměrem řešitelského týmu firmy Exerion bylo ohýbání na ohraňovacích lisech. Proto bylo u konstrukce nástroje kromě rozměrů funkční části nutno respektovat i tvar a rozměry upínací části. Výrobce lisů Trumpf používá pro upínání nástrojů lištu s hydraulickou fixací. Horní nástroj má tedy průřez upínací části velmi podobný písmenu X, zatímco spodní nástroj nepotřebuje nijak zvláštní tvar upnutí, jelikož jej přitlačuje do lišty gravitační síla a v průběhu ohýbání i ohýbací síla. Funkční část je nutno vyrobít tak, aby součást po zpracování měla poloměr ohybu 80 mm a zároveň obě ramena svírala úhel 91° . Nástroj se tedy bude skládat ze dvou částí (horní a spodní), podobně jako u standardního V ohybu. Označení bude korespondovat se standardními nástroji, s výjimkou doplnění o přízvisko „spec“, horní tedy bude označen jako *OWR80 spec* (viz obrázek 33), zatímco dolní *EVR80 spec* (viz obrázek 35). Při konstrukci nástroje je nezbytné zohlednit přítomnost prvních dvou ohybů před zpracováním součásti 137122248 v tomto nástroji. V podstatě jde o to, aby jeho rozměry nezpůsobily kolizi s těmito ohyby, případně nezdeformovaly jejich oblouky. Z tohoto důvodu bylo od samého počátku zamýšleno, že šířka nástroje nebude pokrývat celou širší pásu ve zpracovávané oblasti.

Podstatným prvkem bylo dosažení co nejpřesnějšího tvaru součásti 137122248 před jejím ručním dotvořením ve svařovacím přípravku. Proto by mělo dojít k jisté formě kalibrace lisováním vyšší silou ve tvarovém nástroji. S ohledem na snadnou ruční úpravu (dorovnání) součásti o poměrně velkých rozměrech a velmi nízké tloušťce plechu však nebyl důraz na výsledný úhel až tak zásadní. Jak již bylo zmíněno, svařovací přípravek počítal s nutností korekce tvarů a byl tedy navrhnut tak, aby dotlačením součásti na pevné dorazy došlo k její rozměrové a tvarové korekci.

Ohýbání má probíhat stejným způsobem jako standardní V ohyb. Nástroj tedy bude upnut tak, že součást se do stroje založí příčně k nástrojové liště a dorazí se na doraz stroje. Ten bude programem nastaven do odpovídající pozice. Samotné tváření tedy proběhne na jeden ohyb a celkově bude součást 137122248 zhotovena na 4 ohyby ve dvou stanicích.

4.2 Výroba a kontrola

Jelikož firma Exerion běžně vyrábí ze za tepla válcované oceli o tloušťce 5 mm, rozhodla se, že nástroj bude poskládán z plechových výřezků o tloušťce právě 5 mm. Tyto budou skoličovány a sešroubovány. Aby nebyla postižena jakost zpracovávané součásti, takto sešroubované



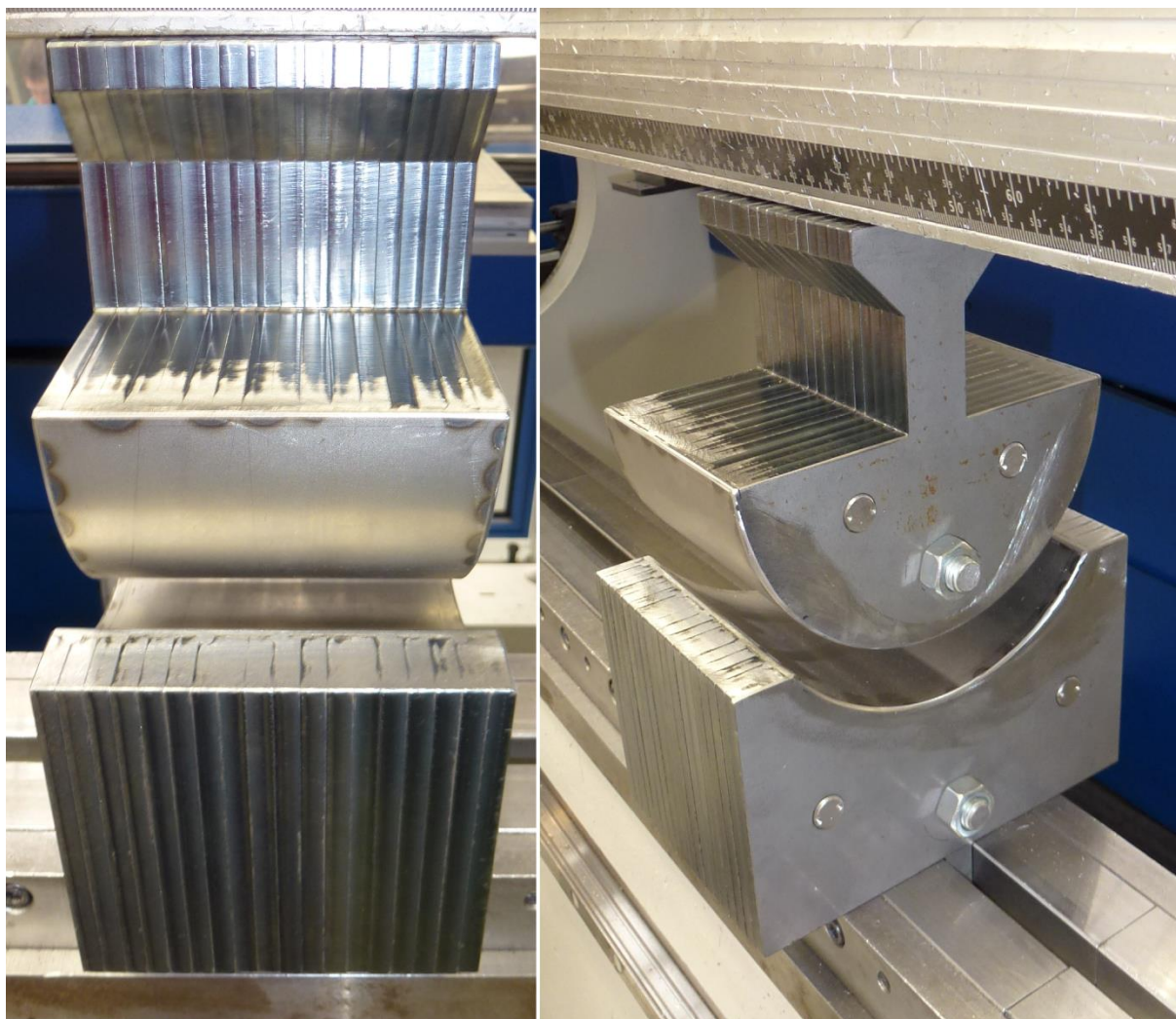
Obr. 33 Horní ohýbací nástroj OWR80 spec

plechy budou v místě kontaktu s dílem potaženy tenkým plechem. Vše bude ve výsledku svařeno. Stejný princip byl aplikován na výrobu horního i spodního nástroje. Pro dosažení výsledné přesnosti pak došlo k zabroušení funkčních ploch obou nástrojů. Horní nástroj *OWR80*



Obr. 35 Spodní ohýbací nástroj EVR80 spec
spec byl sestaven z 16 plechových plátů, zatímco spodní nástroj z 18 kusů. Konstrukce nástroje se od prvopočátku odvíjela spíše experimentální cestou, jelikož se podobná metoda realizovala ve firmě Exerion PTO vůbec poprvé.

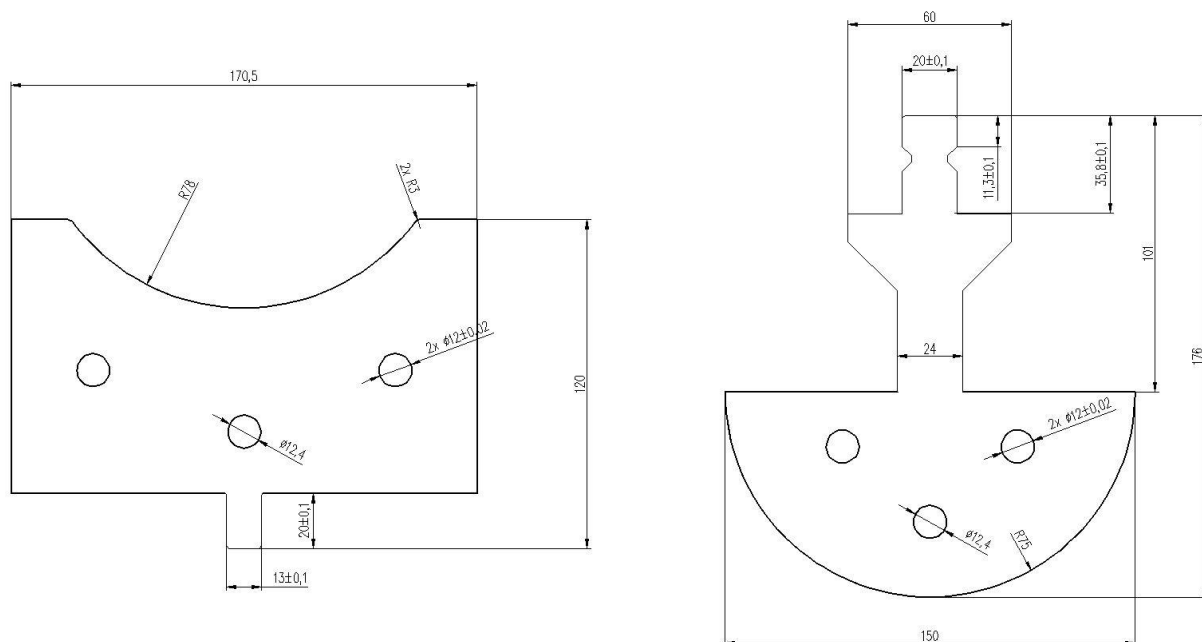
Po dokončení výroby nástroje proběhly testy na zkušební sérii výrobku 137122248. Po oh-



Obr. 34 Nástroje OWR80 spec a EVR80 spec upnuté ve stroji

nutí několika kusů byly jasné dva závěry. Nástroj splňuje požadavky na stabilitu výrobního procesu, avšak výsledný rádius není dostatečně blízký zamýšlenému. Bylo tedy nezbytně nutné vyrobit nástroj stejnou metodou znovu, s mírně pozměněnou geometrií.

Oba nástroje se do nástrojové lišty ohraňovacího lisu vkládají stejně jako standardní horní a spodní nástroj (viz obrázek 34). Zakládání plechu do stroje probíhá tedy také v běžném režimu jak je zřejmé z obrázku (viz obrázek 37). Další podrobnosti k ohýbání jsou k nahlédnutí



Obr. 36 Základní geometrie nástrojů OWR80 spec a EVR80 spec

v přiloženém ohýbacím programu. Geometrie nástroje je pak nejlépe patrná z obrázku (viz obrázek 36), kde je zaznačen i výsledný poloměr horního nástroje před přebroušením.

4.3 Výhled pro konstrukci nástroje

S ohledem na množství aktuálně vyráběných kusů nebylo třeba řešit výrobu trvanlivějšího nástroje. V případě navýšení výrobní dávky by však bylo třeba upravit konstrukci nástroje tak, aby vyhovoval většímu množství vyráběných kusů (materiál, povrchová úprava, montáž jednotlivých dílů).

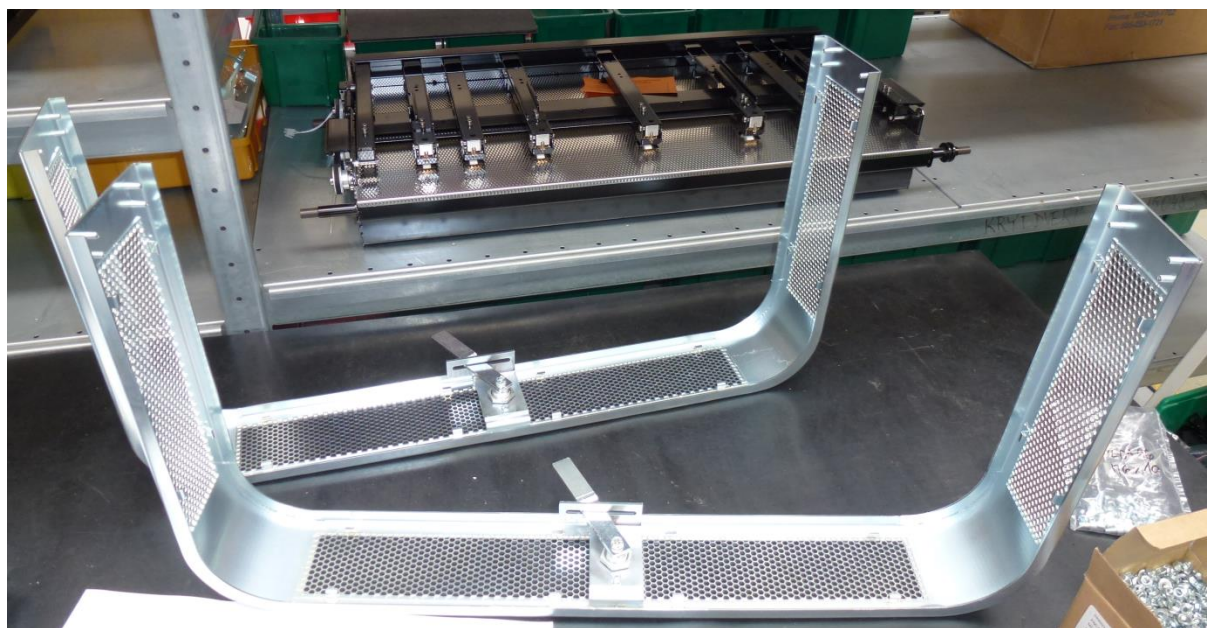


Obr. 37 Průběh ohýbání poloměru 80 mm

5 EKONOMICKÉ VYHODNOCENÍ

Při pohledu na původní technologii výroby metodou hydroform v porovnání s nově aplikovanou výrobou prostřednictvím tváření a svařování, lze udělat jakési obecné zhodnocení. Vzhledem k faktu, že firma Exerion PTO nemá k dispozici původní (a tedy) konkurenční cenovou nabídku, která se vztahovala právě na výrobu pomocí metody hydroform, následující údaje budou spíše odhadem. Informace, které pramenily od zákazníka, naznačovaly, že z hlediska výroby nástrojů a přípravků pro testovací i sériovou produkci celé sestavy Skeleton Bottom Frame, se řešení firmy Exerion PTO lišilo od konkurence o jeden řád. Varianta ohýbání a svařování byla více než dvacetinásobně levnější.

Pro komplexní posouzení zakázky je nutno vzít v potaz sériovost výroby součástí a její pravděpodobnou životnost. Obecně se v tomto odvětví strojírenství neuvažuje o výrobě trvající déle než přibližně 8 let, tento údaj se označuje jako životní cyklus. Druhým poměrně důležitým faktem bylo riziko nutnosti výroby nového přípravku. Případně změna stávajícího při reálně hrozící revizi výrobku. Zákazník uvažoval s výrobou 120 – 150 kusů celé sestavy Skeleton Bottom Frame ročně. Při předpokladu (opět dle odhadů na základě zkušenosti s trhem),



Obr. 38 Výsledek testovací série před závěrečnou montáží

že výrobní řešení jednoho kusu od firmy Exerion bylo 1,2 až 1,5 násobně dražší než konkurenční řešení, lze dojít k závěru, že by se ekonomicky obě varianty v absolutním srovnání velmi blížily. Samozřejmě za předpokladu výroby po dobu 8 let a zároveň při úvaze, že nástroje vyrobené pro první verzi budou použitelné bez větších úprav i pro revidovanou výrobu. Předpokládat, že by stávající design sestavy vydržel po celý životní cyklus sestavy, je však poměrně nemyslitelné i s ohledem na zadání zakázky. Jedná se o prototyp, kde se v následujícím období očekává řada změn. První už jsou na cestě, nicméně nejspíš se nebude zatím jednat o takové úpravy, které by nezbytně vedly k výrobě nových nástrojů a přípravků.

Obrovskou ekonomickou výhodou celé zakázky tak zůstává nižší cena nástrojů. Zákazník se rozhodl pro jednorázovou platbu za jejich výrobu, proto jsou tyto nástroje fakticky v jeho majetku a dále nejsou zohledněny v ceně jednoho kusu prodaného výrobku. Se zákazníkem při ocenění poptávky byla také dohodnuta dávka výroby a to tak, že v případě výroby 30 a více kusů bude cena za jednotku poloviční vůči ceně při výrobě 1 až pěti kusů. Tento cenový

rozpor se však nevztahoval na výrobu testovací a ověřovací série. Zde bylo zapotřebí vyrobit 3 až 5 kusů při testovací a dalších 5 až 10 kusů při ověřovací sérii. Nakonec byly vyrobeny 3 kusy v prototypové dávce (viz obrázek 38). Ty navíc na výjimku dostaly možnost změny povrchové úpravy z práškového laku na elektrolytické zinkování, které bylo rychleji realizovatelné. Později bylo vyrobeno 5 kusů ověřovací série (viz obrázek 39). Neduhem byl požadavek zákazníka dodat sestavy v čase o 30 % kratším než je standardní smluvní dodací lhůta. Ta



Obr. 39 Smontovaná součást (z ověřovací série) před zabalením

činí 6 týdnů, a to od přijetí objednávky až po expedice hotových výrobků. V další výrobě by situace se zrychlenou dodací lhůtou neměla nastat, stejně jako problémy se standardizací procesu jsou již zažehnány.

Z hlediska dalšího rozvoje výroby by mohlo být přikročeno k výrobě robustnějšího ohýbacího nástroje z nástrojové oceli. Dodavatel Trumpf je schopen tento nástroj kompletně zkonstruovat na základě technologických zkoušek s dodaným použitým materiálem. Stačí k tomu jen 6 – 8 týdnů dodací lhůty a v neposlední řadě také dostatečný rozpočet pro danou objednávku.

Dalším prostorem ke zlepšení je určitě broušení součástí. Jeho výrobní čas i kvalita broušení by se dala snížit výrobou přípravku pro udržení potřebných úhlů, případně poptáním automatického pojezdu. Zde by však nepomohl běžně dostupný standardní mechanismus, ale musel by být vytvořen speciální pro daný díl. Všechno je otázkou detailnějšího ekonomického rozboru. Stačí spočítat případnou úsporu strojního času stejně jako práce dělníka a porovnat s pořizovacími náklady nového řešení a náklady na jeho provoz.

6 ZÁVĚR

Řešeným úkolem byla výroba součásti na základě objednávky a výkresové dokumentace od zákazníka. Původní technologií, tedy hydroform, firma Exerion PTO nedisponuje. Proto bylo záměrem navrhnout technologický postup s užitím stávajících výrobních možností společnosti včetně strojového parku a použitím takových nástrojů a přípravků, aby jejich cena nepřekročila rozpočet zakázky.

Nejdříve byla součást rozdělena na 2 díly (137122248 a 137122249). Dále byly provedeny výpočty technologičnosti součástí. Maximální střížnou sílu o velikosti 47,9 kN potřebnou pro výrobu je stroj schopen zajistit, jelikož dokáže vyvinout sílu až o velikosti 220 kN. Ohraňovací lis může působit silou až o velikosti 850 kN, což je násobně více než potřebná maximální ohýbací síla 294,3 kN. Konstrukce a výroba nového speciálního ohýbacího nástroje je popsána ve čtvrté kapitole. Jde o horní (OWR80 spec) a spodní (a EVR80 spec) ohýbací nástroj pro tváření rádia o velikosti 80 mm. Výrobou testovací série o 3 kusech byla ověřena správnost jeho návrhu i funkčnost. Svařením dílu 137122248 (1 ks) a 137122249 (4 ks) bylo dosaženo výsledného dílu 137322191. Tato součást se úspěšně smontovala do sestavy Skeleton Bottom Frame.

V průběhu výrobního procesu také vznikly dva nové podněty k potenciálnímu rozšíření řešení. Zaprvé to je výroba ohýbacích nástrojů elektroabrazivním obráběním z nástrojové oceli a zadruhé návrh konstrukce speciálního přípravku pro broušení dílu 137322191. Obě tyto varianty zůstaly prozatím otevřeny k další diskuzi ve firmě Exerion PTO.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. BAREŠ, Karel, Karel DÍTĚ, Vladimír HAŠEK, František HRAZDIL, Rudolf HÝSEK, Zdeněk KEJVAL, Miroslav KOŘÍNEK, Vladimír KRAUS, Jaroslav KRYŠTOF, Karel KUNHART, Viktor MIKEŠ, Jindřich NĚMEC, Jiří PACHL, Jaroslav SMRČKA, František SOMMER, Bohuslav STEJSKAL, Oldřich STŘEDA, Emil ŠKRABAL, Jaroslav TMĚJ, Miroslav VANĚK a Jaroslav VRTĚL. *Lisování*. Praha: SNTL, 1971, 544 s.

2. BOLJANOVIC, Vukota. *Sheet metal forming processes and die design*. New York: Industrial Press, 2004, 217 s. ISBN 08-311-3182-9.

3. CUTTING TECHNOLOGIES LTD. *Laser & cutting engraving services: Stainless steel* [online]. 2014 [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: http://www.cut-tec.co.uk/materials/laser-cutting/stainless-steel/stainless-steel-std/#.U3Thk_1_tik

4. DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. *Technologie tváření: plošné a objemové tvaření*. 2. vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2007, 169 s. ISBN 978-80-214-3425-7.

5. DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ, Milan HORÁČEK, Ladislav ZEMČÍK, Bohumil KANDUS, Jaroslav KUBÍČEK, Evžen VYPLAŠIL a Ladislav ŽÁK. *Technologie II*. 3. dopl. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004, 238 s. ISBN 80-214-2683-7.

6. EXERION PRECISION TECHNOLOGY. *Exerion Precision Technology* [online]. 2010 [cit. 2010-11-10]. Dostupné z: <http://exerion.nl/index2.html>

7. EXERION PRECISION TECHNOLOGY OLOMOUC S.R.O. Modulové sestavy, přesné díly a speciální technologie. *Profil firmy* [online]. 2011 [cit. 2013-11-12]. Dostupné z: http://www.exerion.cz/modulove_%20sestavy_%20presne_dily_a_specialni_tehnologie_p_r_o_f_i_l_Exerion.html

8. FREMUNT, Přemysl a Tomáš PODRÁBSKÝ. *Konstrukční oceli*. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 1996, 261 s. ISBN 80-858-6795-8.

9. FRONIUS ČESKÁ REPUBLIKA S.R.O. *Produkty - obloukové svařování* [online]. 2014 [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-F2C70A70-D9D77926/fronius_ceska_republika/hs.xsl/29_984.htm#.U4bwj_1_tik

10. FÜRBACHER, Ivan, Karel MACEK, Josef STEIDL, Anton PUŠKÁR, Josef CIZNER, Bohumír ESTERKA, Jan HAKL, Vladimír SEDLÁČEK, Vladivoj OČENÁŠEK, Jaroslav HELL, Vladimír HANYKÝŘ a Zdeněk KOŘÍNEK. *Lexikon technických materiálů: se zahraničními ekvivalenty*. Praha: Verlag Dashöfer, 2000, 4 sv. (na volných listech). ISBN 80-862-2902-5.

11. HOSFORD, William F. a Robert M. CADDELL. *Metal forming: Mechanics and metallurgy*. 2nd ed. Englewood Cliffs: PTR Prentice Hall, 1993, 364 s. ISBN 01-358-8526-4.

12. LEINVEBER, Jiří a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 5. upravené vydání. Úvaly: Albra, 2011, 927 s. ISBN 978-80-7361-081-4.

13. SVÁŘEČKY-ELEKTRODY.CZ. *Svářečka CO2, svářečky, invertory, svářecí technika* [online]. 2014 [cit. 2014-05-26]. Dostupné z: <http://www.svarecky-elektrody.cz/svarovani-tig-zakladni-seznameni/t-356/>

14. SVAZ STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE. *SST: Katalog* [online]. 2014 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://www.sst.cz/katalog/technologies>

15. TEKPRO GROUP INC. *Tekpro_Hydroforming* [online]. 2014 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: http://www.tekprogroup.com/tekpro_hydroforming_003.htm

16. TRUMPF ČESKÁ REPUBLIKA. *Laserové řezání* [online]. 2014 [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/cs/produkty/laserova-technika/reseni/oblasti-pouziti/laserove-rezani.html>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
3D	[-]	Prostorový, trojrozměrný
CNC	[-]	Počítačové číslicové řízení
CT	[-]	Počítačová tomografie
MIG	[-]	Metoda tavného svařování
TIG	[-]	Metoda tavného svařování
Symbol	Jednotka	Popis
A_o	[J]	Práce vykonaná ohýbací silou
A_s	[J]	Práce vykonaná střížnou silou
F_k	[N]	Kalibrovací síla
F_o	[N]	Ohýbací síla
F_{omax}	[N]	Maximální ohýbací síla
F_p	[N]	Přidržovací síla
F_s	[N]	Střížná síla
F_{smax}	[N]	Maximální střížná síla
R_{80}	[mm]	Vnitřní poloměr ohybu 80 mm
R_o	[mm]	Poloměr ohybu (vnitřní)
R_e	[MPa]	Mez kluzu
R_m	[MPa]	Mez pevnosti
R_{max}	[mm]	Minimální poloměr ohybu
R_{min}	[mm]	Maximální poloměr ohybu
S_o	[mm ²]	Plocha polotovaru v průmětu kolmém na pohyb ohybníku
S_s	[mm ²]	Plocha stříhu
b	[mm]	Šířka polotovaru
b_1	[mm]	Šířka polotovaru po ohybu
c	[-]	Koeficient typu stříhání
h	[mm]	Pracovní zdvih ohýbadla
k	[-]	Koeficient poměru R_o/s

k_{80}	[-]	Koeficient poměru R_o/s (pro R80)
l_d	[mm]	Délka rozvinutého plechu
l_o	[mm]	Délka neutrální plochy (R80)
$l_{o\check{s}}$	[mm]	Délka neutrální plochy pro výpočet šířky
$l_{\check{s}}$	[mm]	Šířka rozvinutého plechu
m	[-]	Koeficient průběhu obýbací síly
n	[-]	Součinitel otupení nástroje
p	[MPa]	Měrný tlak
s	[mm]	Tloušťka plechu
s_1	[mm]	Tloušťka plechu po ohybu
v	[mm]	Střižná vůle
x	[-]	Koeficient posunutí neutrální plochy
z	[mm]	Střižná mezera
z_r	[-]	Součinitel rozšíření původního průřezu
z_z	[-]	Součinitel ztenčení
β	[°]	Úhel odpružení
ϵ_c	[-]	Mezní prodloužení
λ	[-]	Součinitel plnosti
ρ	[mm]	Poloměr neutrální plochy
ρ_{80}	[mm]	Poloměr neutrální plochy (R80)
τ	[MPa]	Střižný odpor
φ	[°]	Úhel ohybu

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Typické součásti vyrobené tvářením [14]	9
Obr. 2 Sídlo Exerion Precision Technology Ulft v Nizozemí [6]	10
Obr. 3 Prostory firmy Exerion Precision Technology Olomouc [7].....	10
Obr. 4 Sestava krytů CT zařízení „Skeleton Bottom Frame"	11
Obr. 5 Model řešené součásti Plinth Backpack	11
Obr. 6 Rozměry součásti „Plinth Backpack“ (zákaznické číslo 4598-003-04271)	12
Obr. 7 Řez A-A řešenou součástí.....	12
Obr. 8 Fáze stříhání [2]	14
Obr. 9 Průběh sil; práce [4].....	15
Obr. 10 Plocha řezu (laser) [3].....	16
Obr. 11 Schéma řezání laserem [16].....	16
Obr. 12 Schéma ohýbání [4]	17
Obr. 13 Změna průřezu ohnutého dílu [4]	17
Obr. 14 Schéma ohýbání do tvaru U (vlevo) a V (vpravo) [4]	18
Obr. 15 Součinitel ztenčení při ohýbání měkké oceli o 90° [4].....	19
Obr. 16 Svařování TIG [13].....	20
Obr. 17 Svařovací zdroj a hořák pro TIG svařování výrobce Fronius [9].....	21
Obr. 18 Obecný postup tváření metodou hydroform [15]	22
Obr. 19 Pořadí ohybů na rozvinutém tvaru (1-30).....	22
Obr. 20 Součást po prvních 2 ohybech	23
Obr. 21 Model rozdělení součásti	23
Obr. 22 Plochá část lemu (díl 137122249)	24
Obr. 23 Rozvinutý tvar dílu 137122248	24
Obr. 24 Kombinovaný laser Trumpf TC600L [7]	25
Obr. 25 Označení úseků pro výpočet délky rozvinutého tvaru součásti.....	26
Obr. 26 Postup ohýbání	27
Obr. 27 Ohraňovací lis Trumpf TrumaBend V85X.....	27
Obr. 28 Vybrané fáze ohýbání dílu 137122248 postupnými ohyby a vznik kolize	28
Obr. 29 Svařovací přípravek č. 22191	29
Obr. 30 Změna přiložení dílu 137122249 za účelem snížení nákladů na broušení	30
Obr. 31 Náčrt úpravy dílu 137122249 s označenými hranami pro zajištění pozice	30
Obr. 32 Přípravek č. 22191 s dílem 137322191 a detail upnutí (vpravo).....	30
Obr. 33 Horní ohýbací nástroj OWR80 spec.....	31
Obr. 34 Nástroje OWR80 spec a EVR80 spec upnuté ve stroji	32
Obr. 35 Spodní ohýbací nástroj EVR80 spec	32
Obr. 36 Základní geometrie nástrojů OWR80 spec a EVR80 spec.....	33
Obr. 37 Průběh ohýbání poloměru 80 mm	33
Obr. 38 Výsledek testovací série před závěrečnou montáží	34
Obr. 39 Smontovaná součást (z ověřovací série) před zabalením	35

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Hodnoty součinitele z_r [4].....	19
Tab. 2 Závislost koeficientu x a z_z na součiniteli k [4].....	19
Tab. 3 Chemické složení oceli 11 375 (hmotnostní procento) [10].....	24
Tab. 4 Předpokládaný technologický postup a odhadnuté normohodiny	24
Tab. 5 Opravený technologický postup	29

SEZNAM VÝKRESŮ

137322191	Backpack Assy
137122248	Backpack
137122249	Plochý lem
OWR80spec	Horní ohýbací nástroj
EVR80spec	Spodní ohýbací nástroj

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Program 37112248 (řezání)
Příloha 2	Program 22248 (ohýbání)
Příloha 3	Střížné nástroje TopLantis
Příloha 4	Ohýbací nástroje Trumpf

